



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

# AUTOMATIZACE METODY MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH STRUKTUR REFLEXNÍM DIGITÁLNÍM HOLOGRAFICKÝM MIKROSKOPEM

AUTOMATIZATION OF METHOD OF SURFACE STRUCTURE MEASUREMENT BY MEANS OF  
REFLECTION MODE DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

DANIEL VACULA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. LUDĚK LOVICAR

BRNO 2010



## Abstrakt

Reflexní digitální holografický mikroskop vyvinutý na ÚFI FSI VUT v Brně využívá principu mimoosové holografie s časově a prostorově nekoherentním osvětlením. Mikroskop umožňuje rekonstrukci nejen obrazové amplitudy, ale i obrazové fáze. To se děje prakticky v reálném čase. Jediným omezujícím kritériem je rychlost detekce obrazového hologramu a rychlost výpočetní techniky pro jeho zpracování. Díky rekonstrukci obrazové fáze a obrazové amplitudy lze provádět profilometrická měření s vysokým stupněm rozlišení v osovém směru.

Tato diplomová práce se zabývá automatizací měřící metody, která využívá kombinaci fázového a amplitudového zobrazení, při měření vzorků s povrchovou strukturou jejíž výška způsobuje ve fázovém zobrazení neurčitost fáze s celočíselným násobkem  $2\pi$ . Součástí této práce je konstrukční návrh osvětlovací soustavy mikroskopu a experimentální ověření funkčnosti zautomatizované měřící metody.

## Abstract

Reflected-light digital holographic microscope developed at IPE FME BUT uses off-axis holography principle and low spatial and temporal coherence illumination. Microscope allows reconstruction of the image amplitude and the image phase, which can be handled in real time. The only limiting factors are imaging speed of the detector and computer performance when processing holograms. Reconstruction of image phase and amplitude allows high-resolution profilometric measurements in the vertical axis direction.

This thesis deals with the automatization of profilometric measurement method proposed in [2]. Proposed method uses the combination of the image phase and the image amplitude for the measurement of specimens with surface structure the vertical size of which cause the uncertainty of the image phase by a factor of  $2\pi$ . Further the thesis deals with the construction design of the illumination system of the microscope and its realization together with experimental verification of functionality of proposed method automatization.

## Klíčová slova

Digitální holografická mikroskopie, profilometrie, osvětlovací systém, koherence osvětlení

## Keywords

Digital holographic microscope, profilometry, illuminating system, coherence of illumination light

VACULA, D. *Automatizace metody měření povrchových struktur reflexním digitálním holografickým mikroskopem..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Luděk Lovicar.



### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Lud'ka Lovicara, a že veškerá použitá literatura je zde uvedena.

V Brně dne \_\_\_\_\_

.....



## **Poděkování**

Děkuji Ing. Ludřku Lovicarovi za vedení a cenné připomínky v průběhu tvorby této diplomové práce. Dále děkuji Ing. Tomášovi Slabému za nesčetné konzultace a Ing. Lukášovi Kvasnicovi, který vytvořil ovládání pro řízení osvětlovací soustavy. Děkuji také pánům Milanu Pospíšilovi a Jaroslavu Fukalovi, bez kterých by konstrukční část nikdy nevznikla. Velký dík patří i Ing. Martinu Antošovi PhD. za konstrukční rady a pomoc při výrobě matnice. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům za podporu po celou dobu mého studia.





<b>Úvod</b> .....	1
<b>Digitální holografická mikroskopie</b> .....	3
2.1 Princip a rozdělení digitální holografické mikroskopie .....	3
2.2 Vliv koherence osvětlení .....	4
<b>Reflexní digitální holografický mikroskop</b> .....	7
3.1 Schéma mikroskopu a jeho popis .....	7
3.1.1 Osvětlovací soustava .....	7
3.1.2 Jádru mikroskopu .....	10
3.1.3 Detekční část .....	11
3.2 Tvorba a zpracování obrazu .....	11
3.3 Holografická podmínka .....	12
<b>Měřicí metoda odrazných povrchů pomocí reflexního DHM</b> .....	17
4.1 Postup měřicí metody .....	17
4.2 Fáze mapovaná hloubkově diskriminovanou intenzitou .....	18
<b>Konstrukční návrhy a úpravy</b> .....	21
5.1 Osvětlovač – původní verze .....	21
5.2 Konstrukční návrh nové osvětlovací soustavy .....	22
5.2.1 Návrh a konstrukce základních prvků .....	22
5.2.1.1 Clona .....	22
5.2.1.2 Kolektor a jeho umístění .....	24
5.2.1.3 Matnice .....	26
5.2.1.4 Měnicí systém spektrálních filtrů .....	27
5.2.2 Volba a konstrukce dalších prvků .....	28
5.2.2.1 Podsestava 1 .....	29
5.2.2.2 Podsestava 2 .....	31
<b>Experimentální prověření automatizace</b> .....	39
6.1 PID regulátor .....	39
6.2 Zapojení a řízení clony .....	39
6.3 Zapojení a řízení stejnosměrného lineárního motorku .....	40
6.4 Experiment .....	40
6.4.1 Parametry experimentální sestavy .....	40
6.4.2 Průběh experimentu .....	40
6.4.3 Referenční měření .....	42
6.4.4 Vyhodnocení experimentu .....	43
6.5 Konstrukční úpravy .....	43
<b>Závěr</b> .....	45
<b>Literatura</b> .....	46



# Kapitola 1

## Úvod

Reflexní digitální holografická mikroskopie umožňuje rekonstruovat nejen obrazovou amplitudu jak je tomu u běžných mikroskopů, ale i obrazovou fázi. Fázová mapa obrazu silně závisí na výškové poloze sledovaného bodu na povrchu vzorku. Fázovou mapu lze převést na mapu výšek, a z ní získat informaci o poloze sledovaného bodu s přesností jednotek nanometrů. Podobně jako je tomu u konfokální mikroskopie, i zde je úroveň obrazové amplitudy silně závislá na vzájemné poloze vzorku a předmětové roviny mikroskopu. U reflexní digitální holografické mikroskopie to však je způsobeno časovou a prostorovou koherencí osvětlení, kterou lze řídit změnou velikosti apertury clony a změnou spektrálních filtrů.

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh osvětlovací soustavy reflexního digitálního holografického mikroskopu (DHM) a jeho následná realizace, tak aby systém vyhověl požadavkům na plné zautomatizování měřící metody hlubokých povrchů uvedené v [1,2]. Dalším cílem této práce je experimentální ověření funkčnosti navržené zautomatizované měřící metody na vhodném vzorku.

Diplomová práce je rozdělena do sedmi kapitol. Druhá kapitola se zabývá obecnou digitální holografickou mikroskopií a jejím základním rozdělení. Také popisuje vliv koherence osvětlení na zobrazení.

Třetí kapitola je zaměřena na reflexní mimoosový DHM, vyvinutý na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně, jehož úpravě je věnována tato práce. Tato kapitola umožňuje bližší pohled na konstrukční uspořádání mikroskopu a současně i na popis jeho funkce. Dále je zde popsán postup zpracování obrazu získaného záznamem komplexní amplitudy.

Čtvrtá kapitola popisuje měřící metodu hlubokých povrchů, jenž má být zautomatizována a podle níž je proveden experiment prokazující funkčnost automatizace.

Pátá kapitola se zabývá konstrukcí osvětlovače. Jsou zde popsány jednotlivé konstrukční části, postup jejich návrhu a postup montáže.

V šesté kapitole je popsán průběh a vyhodnocení experimentu. Dále je popsán hlavní prvek stabilizace – PID regulátor. Je zde také uvedeno zapojení a řízení elektronických prvků osvětlovače. V závěru této kapitoly jsou uvedeny konstrukční úpravy a návrhy pro plné využití možností automatizovaného osvětlovače.

Poslední kapitola se zabývá diskuzí výsledků diplomové práce.



## Kapitola 2

# Digitální holografická mikroskopie

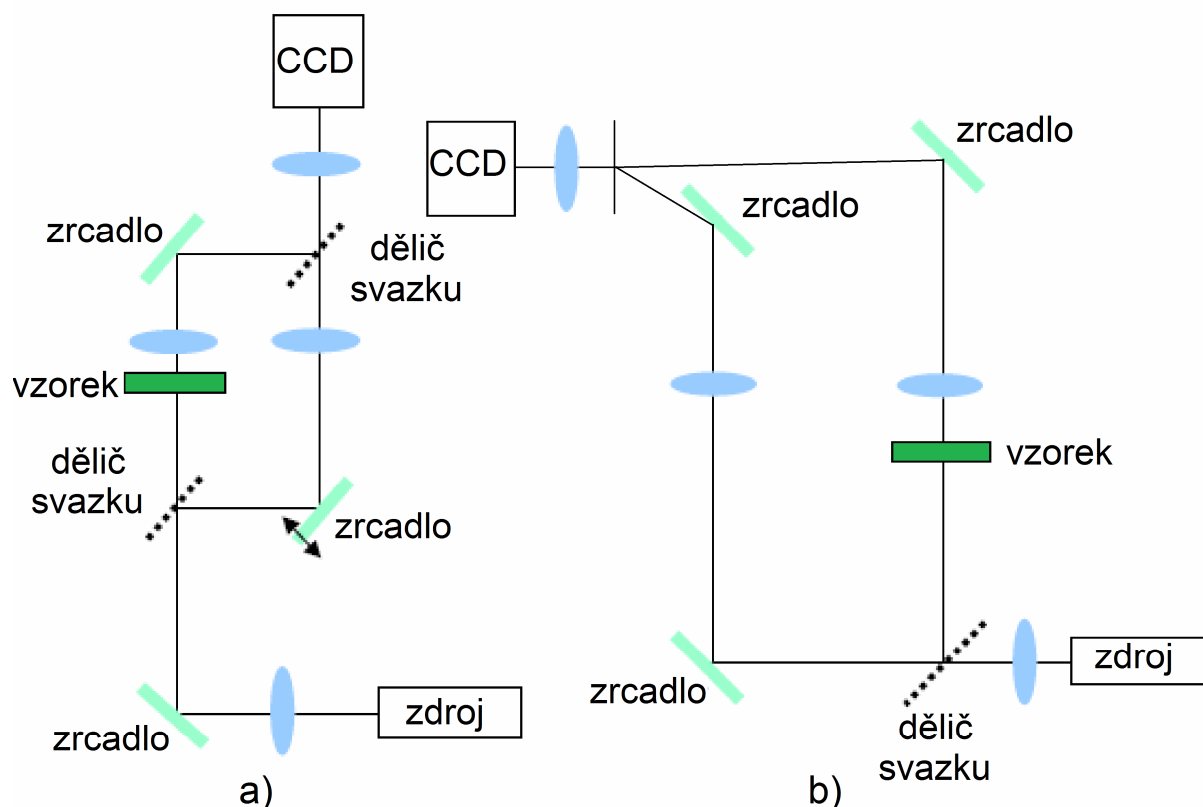
Počátky holografie se datují od roku 1948, kdy britský fyzik maďarského původu Dennis Gabor navrhuje dvoustupňový proces nazývaný rekonstrukce vlny a později holografie (z řeckého holos-celý a grafē-záznam) [3,4]. Při pokusech zvýšit rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu přišel na myšlenku zaznamenat nejen amplitudu, jak tomu bylo doposud, ale i fázi. Plného využití dosáhla holografie až v 60. letech 20. století díky vynálezu laseru jako koherentního, monochromatického zdroje záření. První holografické mikroskopy přinášely nové možnosti zobrazení, avšak chyběly technické prostředky pro převod interferogramu na mikroskopické zobrazení, proto se holografická mikroskopie zpočátku nerozšířila. K velkému rozvoji dochází v 90. letech 20. století díky rychle se rozvíjející výpočetní a digitální záznamové technice. Interferogram se zaznamenává digitálně na CCD čip kamery a dále zpracovává na počítači, proto již nehovoříme pouze o holografické mikroskopii ale o digitální holografické mikroskopii.

### 2.1 Princip a rozdělení digitální holografické mikroskopie

Digitální holografický mikroskop (DHM) je obecně tvořen předmětovou a referenční větví, přičemž svazky z obou větví spolu interferují ve výstupní rovině a vytvářejí interferenční obrazec, který je zaznamenán. K rozdělení světelné vlny na předmětovou a referenční část je použit dělič svazku. Na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně je jako dělič svazku použita difrakční mřížka, která světelnou vlnu rozdělí do daných difrakčních řádů [5].

Digitální holografické mikroskopy dělíme na osové (mezi předmětovou a referenční větví ve výstupní části zařízení je nulový úhel) a mimoosové (mezi předmětovou a referenční větví ve výstupní části je nenulový úhel). Osové holografické systémy (obr. 2.1 a)) mají optickou délku referenční větve časově proměnnou. Referenční vlna má časově proměnný fázový posuv a to způsobuje časovou modulaci výstupního obrazového hologramu. Jelikož pro rekonstrukci jednoho zobrazení je třeba registrovat tři a více snímků hologramu [5], není tento systém vhodný pro zobrazování rychle se měnících vzorků. Mimoosové holografické systémy (obr. 2.1 b)) umožňují díky prostorové nosné frekvenci rekonstrukci obrazu z jednoho hologramu, jsou proto rychlejší a méně citlivé na změny zobrazovacích podmínek v čase [6].

Mimosové i osové digitální holografické mikroskopy můžeme také rozdělit na reflexní DHM, které zobrazují odraženým světlem a transmisní DHM, které zobrazují procházejícím světlem.



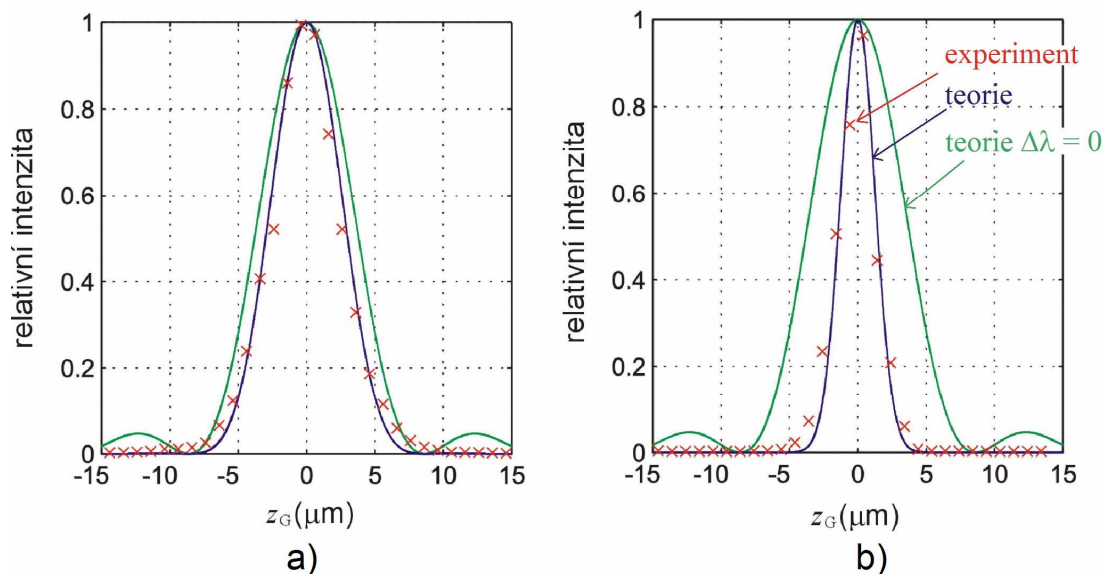
Obrázek 2.1: Schéma a) osového a b) mimoosového transmisního uspořádání DHM.

## 2.2 Vliv koherence osvětlení

Použití koherentního osvětlení s sebou přináší dvě nevýhody: nechtěné interference a koherenční šum. Bylo zjištěno [6], že při nízkokoherentním osvětlení jsou tyto nevýhody potlačeny. Navíc zobrazení při nízkokoherentním osvětlení má konfokální charakter [1]. To znamená, že vícenásobně rozptýlené světlo se nepodílí na vzniku obrazu – obrazová intenzita je hloubkově diskriminovaná.

Aby bylo možné použít časově nízkokoherentního osvětlení, je třeba aby jádro DHM bylo tvořeno achromatickým interferometrem [6]. V případě použití difrakční mřížky jako děliče svazku to znamená, že úhel mezi osami použitých difrakčních řádů je stejný jako úhel, pod kterým tyto svazky interferují a to pro každou vlnovou délku. Ve výstupní rovině tedy tvoří světlo všech vlnových délek interferogramy se stejnou prostorovou frekvencí.

Schopnost hloubkově diskriminovaného zobrazení u reflexního DHM charakterizuje osová intenzitní odezva, což je závislost relativní obrazové intenzity na poloze povrchu vzorku vzhledem k předmětové rovině objektivu [7]. Na obr. 2.3 jsou zobrazeny grafy, které tuto závislost reprezentují. Závislost byla naměřena na reflexním DHM s halogenovou žárovkou jako zdrojem spektrálně širokopásmového osvětlení a objektivu s numerickou aperturou  $NA = 0,25$ . Na obr. 2.3 a) bylo použito úzkopásmového interferenčního filtru se střední vlnovou délkou  $\lambda = 547 \text{ nm}$ , pološířkou pásma vlnových délek  $\Delta\lambda = 15 \text{ nm}$  a koherenční délkou  $L \approx 20 \text{ }\mu\text{m}$ . V druhém případě na obr. 2.3 b) bylo použito osvětlení se širokopásmovým spektrem  $\Delta\lambda = 42 \text{ nm}$  koherenční délky  $L \approx 7 \text{ }\mu\text{m}$ . Teoretické hodnoty jsou značeny plnou čarou, experimenty křížky. Křivka s největší pološířkou hlavního maxima je teoretickou odezvou pro monochromatické osvětlení o vlnové délce  $547 \text{ nm}$  [5].



Obrázek 2.3: Osová intenzitní odezva reflexního DHM. a) úzkopásmový interferenční filtr  $\lambda = 547 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 15 \text{ nm}$ , koherenční délka  $L \approx 20 \mu\text{m}$ . b) širokopásmové spektrum  $\Delta\lambda = 42 \text{ nm}$  koherenční délky  $L \approx 7 \mu\text{m}$ . Převzato z [1].

V dalších kapitolách této práce se používá pojmů koherentní a nekoherentní mód, které jsou popsány v tomto odstavci. O koherentním módu mluvíme, osvětlujeme-li měřené struktury kvazi-monochromatickým bodovým zdrojem. Při tomto módu je pološířka hlavního maxima osové intenzitní odezvy široká a proto nedochází k hloubkové diskriminaci intenzity. Z teorie vyplývá [5], že s rozšířením spektrálního intervalu osvětlení a použitím plošného zdroje dojde ke zúžení pološířky hlavního maxima osové intenzitní odezvy a tím i k hloubkově diskriminovanému zobrazení. V nekoherentním módu tudíž můžeme provádět tenké optické řezy.





## Kapitola 3

# Reflexní digitální holografický mikroskop

Na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně byl vyvinut Reflexní DHM jemuž je z důvodů jeho modifikace v této práci věnována tato kapitola. Tento mikroskop využívá principu mimoosové nekoherentní holografie s plošným zdrojem.

Konstrukční uspořádání mikroskopu umožňuje použití osvětlení s širokým rozsahem časové a prostorové koherence, což umožňuje významně ovlivňovat šířku optických řezů. Pokud je šířka optických řezů malá, je vzorek zobrazován hloubkově diskriminovanou intenzitou. U reflexního DHM, na rozdíl od konfokálního mikroskopu, který také zobrazuje vzorek hloubkově diskriminovanou intenzitou, je obraz vzorku získán bez rastrování v celém zorném poli objektivu najednou.

### 3.1 Schéma mikroskopu a jeho popis

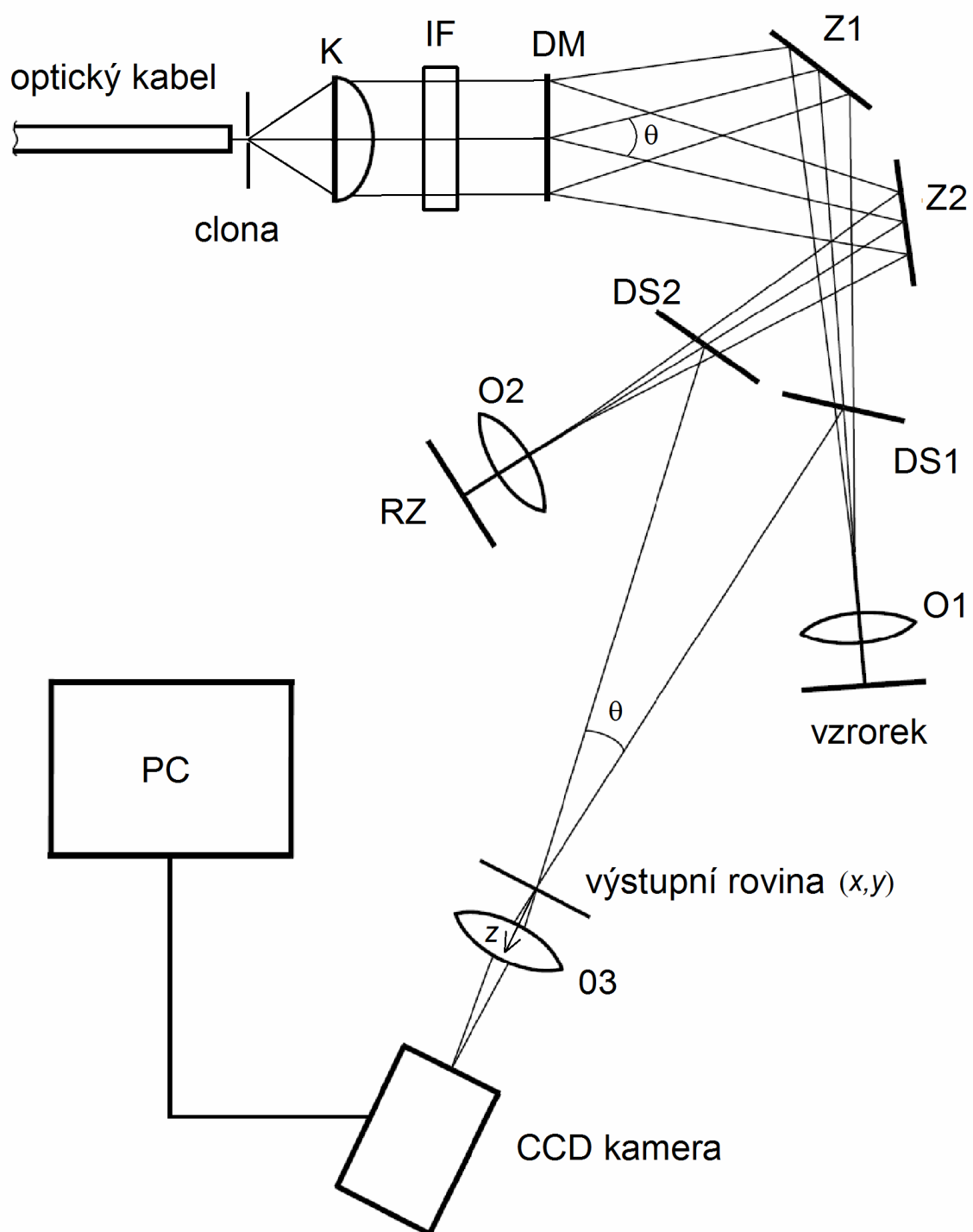
Reflexní DHM (obr. 3.1) může být v principu rozděleno na tři základní části. První částí je osvětlovací soustava, druhou je samotné jádro mikroskopu a třetí je detekční část.

#### 3.1.1 Osvětlovací soustava

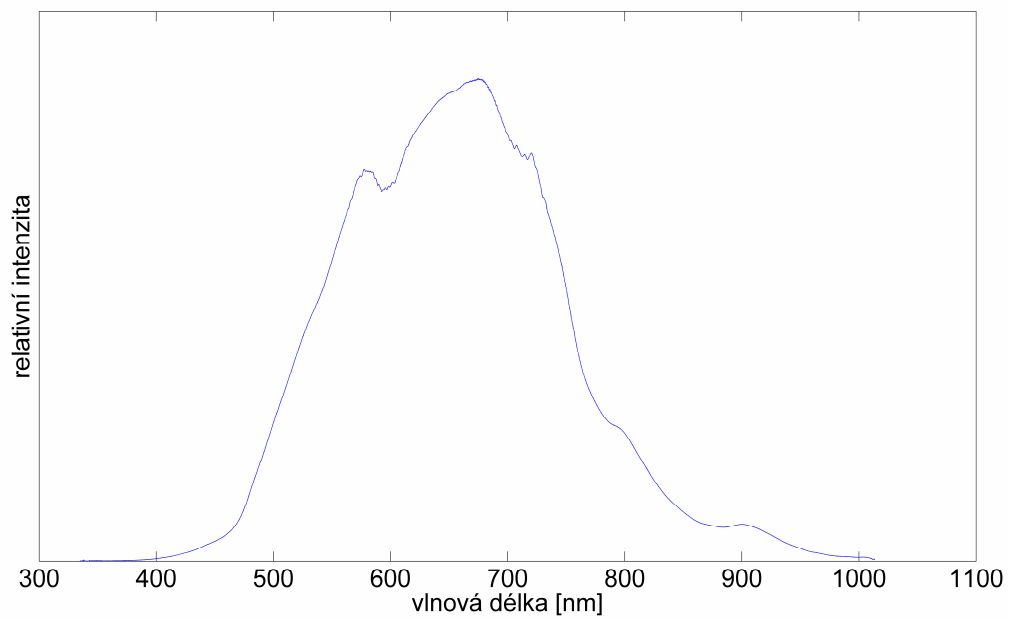
Osvětlovací soustava je tvořena světelným zdrojem, optickým vláknem, clonou, matnicí a spektrálním nebo spektrálně neutrálním filtrem. Jako světelný zdroj je nejčastěji použita halogenová žárovka o výkonu 100 W nebo 150 W. Ze světelného zdroje prochází světlo optickým vláknem a dopadá na clonu, jejíž obraz je zobrazen do systému interferometru popsaneho níže. Toto uspořádání je použito v případě, pokud je třeba měnit velikost zdroje a tím i prostorovou koherenci. V případě, že není zobrazena clona, zobrazuje kolektor (K) přímo výstup optického vlákna. Kolektor fokusuje svazek do zadní ohniskové roviny objektivu (O1,O2), tím je docíleno Köhlerova osvětlení. Za kolektorem je umístěn interferenční filtr (IF) s maximem propustnosti  $\lambda = 550$  nm a pološířkou maxima  $\Delta\lambda = 10$  nm. Ačkoli je mikroskop navržen pro centrální vlnovou délku  $\lambda = 547$  nm, lze použít i zdroje světla s odlišnou vlnovou délkou. Tato vlnová délka však musí být v rozsahu spektrální propustnosti optické soustavy mikroskopu, znázorněné na obr. 3.3. Aby světelné vlny z předmětové i referenční větve spolu mohly ve výstupní rovině interferovat a podílet se tak na zobrazení, musí být vlnová délka také v rozsahu spektrální propustnosti korigované spektrální intenzity, vypočtené podle [8] a znázorněné na obr. 3.4. Z tohoto obrázku je patrné, jaké množství světla se podílí na výstupní interferenci při různých vlnových délkách.

Jako zdroj světla může být použita také laserová dioda. K odstranění nechtěné interference i koherentní zrnitosti díky prostorové koherenci laseru a dosažení konfokálního zobrazení, je třeba získat prostorově nekoherentní svazek světla. Toho bude docíleno, bude-li svazek z laseru procházet soustavou pevné a rotující matnice [9]. Body matnice se pak chovají jako vzájemně nekoherentní kvazimonochromatické světelné zdroje.

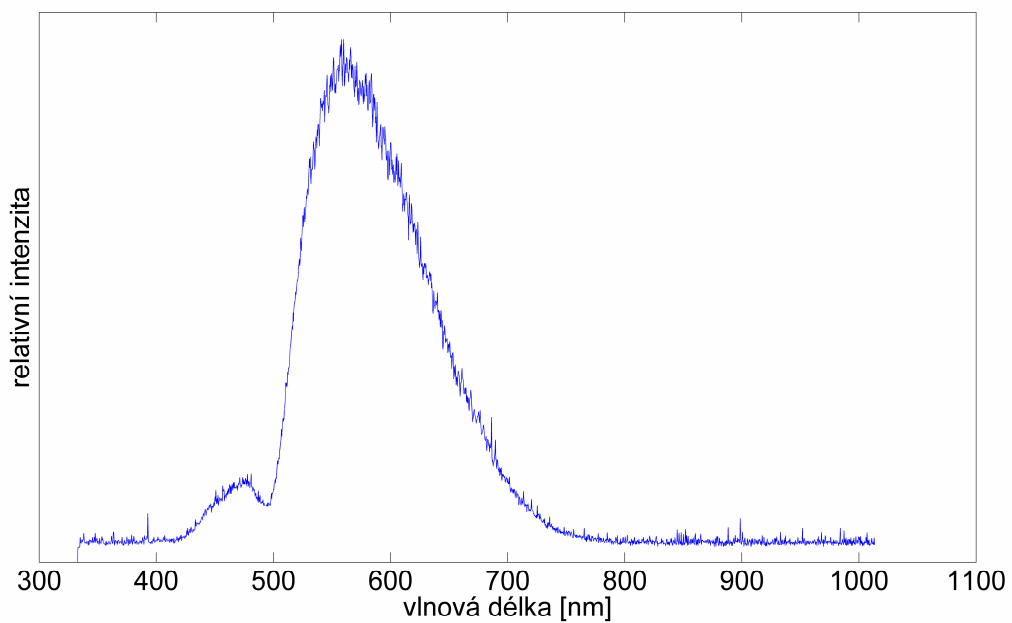
Na obr. 3.2 je vyobrazena spektrální intenzita zdroje o výkonu 150 W. Porovnáním s obr. 3.3, vidíme jaká je spektrální propustnost mikroskopu kvůli disperzi světla na difrakční mřížce a kvůli umístění objektivů.



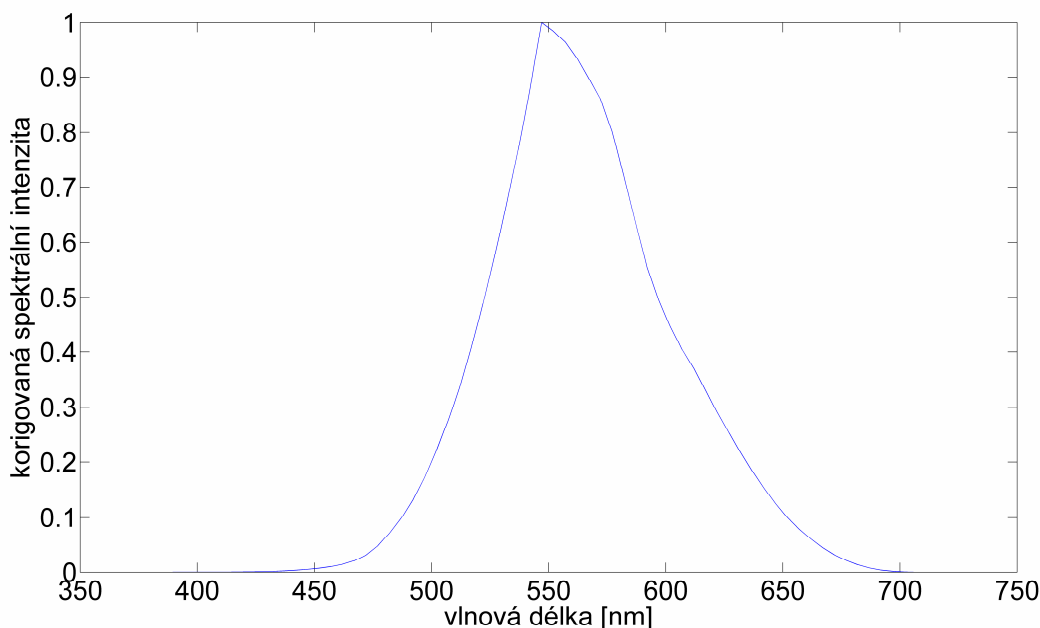
Obrázek 3.1: Schéma mikroskopu.



Obrázek 3.2: Spektrální intenzita světla halogenové žárovky o výkonu 150 W.



Obrázek 3.3: Spektrální intenzita světla halogenové žárovky o výkonu 150 W po průchodu mikroskopem.



Obrázek 3.4: Korigovaná spektrální intenzita pro plně vysvícenou pupilu objektivů O1 a O2.

### 3.1.2 Jádru mikroskopu

Jádru mikroskopu je v podstatě dvousvazkový achromatický interferometr. Skládá se z fázové binární difrakční mřížky o hustotě čar  $f = 150$  čar/mm, dvou zrcadel, dvou děličů svazku, dvojice ekvivalentních planachromatických mikroskopových objektivů ( $10\times/NA = 0,25$  nebo  $20\times/NA = 0,5$ ) a z referenčního zrcadla. Svazek nekoherentního světla z osvětlovací soustavy dopadá na fázovou binární difrakční mřížku (DM), kde se rozdělí na jednotlivé difrakční řády. Pro osvětlení je použit +1. a -1. difrakční řád. Díky tomu je zaručené stejně intenzitní osvětlení v obou větvích mikroskopu. Úhel mezi těmito difrakčními řády je podle [10] dán vztahem

$$\sin \frac{\theta}{2} = \lambda f, \quad (3.1)$$

kde  $\theta$  je úhel mezi difrakčními řády,  $\lambda$  je vlnová délka světla a  $f$  je prostorová frekvence mřížky daná vztahem  $f = 1/d$ , kde  $d$  je mřížková konstanta.

$$\arcsin \frac{\theta}{2} = \lambda f = 547 \cdot 10^{-6} \cdot 150 = 0,082 \Rightarrow \theta = 9,4^\circ.$$

Takto rozdělený svazek světla je v jednom případě směřován zrcadlem (Z1) do předmětové větve, kde prochází děličem svazku (DS1), dále pak objektivem (O1) a dopadá na vzorek, od kterého se odráží. Odražený svazek světla je směřován týmž děličem svazku tentokrát do výstupní roviny mikroskopu. Ve druhém případě je svazek světla směřován zrcadlem (Z2) do větve referenční, kde prochází děličem svazku (DS2) a přes objektiv (O2) dopadá na referenční zrcadlo (RZ). Zpětně odražený svazek je rovněž směřován děličem svazku do výstupní roviny mikroskopu, kde se skládá se světelným svazkem z předmětové větve. Oba svazky vzniklé za difrakční mřížkou procházejí optickými prvky se stejnými parametry a urazí stejnou optickou dráhu, proto dochází ve výstupní rovině k jejich interferenci. Interferenční podmínka je však splněna pouze pro světlo, které vychází z oblasti vzorku ležící v těsné blízkosti předmětové roviny objektivu. Takto vzniká v obrazové rovině objektivu obrazový hologram řezu vzorku předmětovou rovinou. Díky piezoelektrickému stolku na kterém je vzorek umístěn, se dají provádět řezy v jednotlivých úrovních vzorku.

### 3.1.3 Detekční část

Obrazový hologram je třeba zaznamenat. K tomu slouží CCD čip kamery, na který je zobrazen hologram prostřednictvím objektivu (O3). Předmětová rovina objektivu (O3) je ztotožněna s výstupní rovinou mikroskopu. Obrazový hologram je následně numericky zpracován.

## 3.2 Tvorba a zpracování obrazu

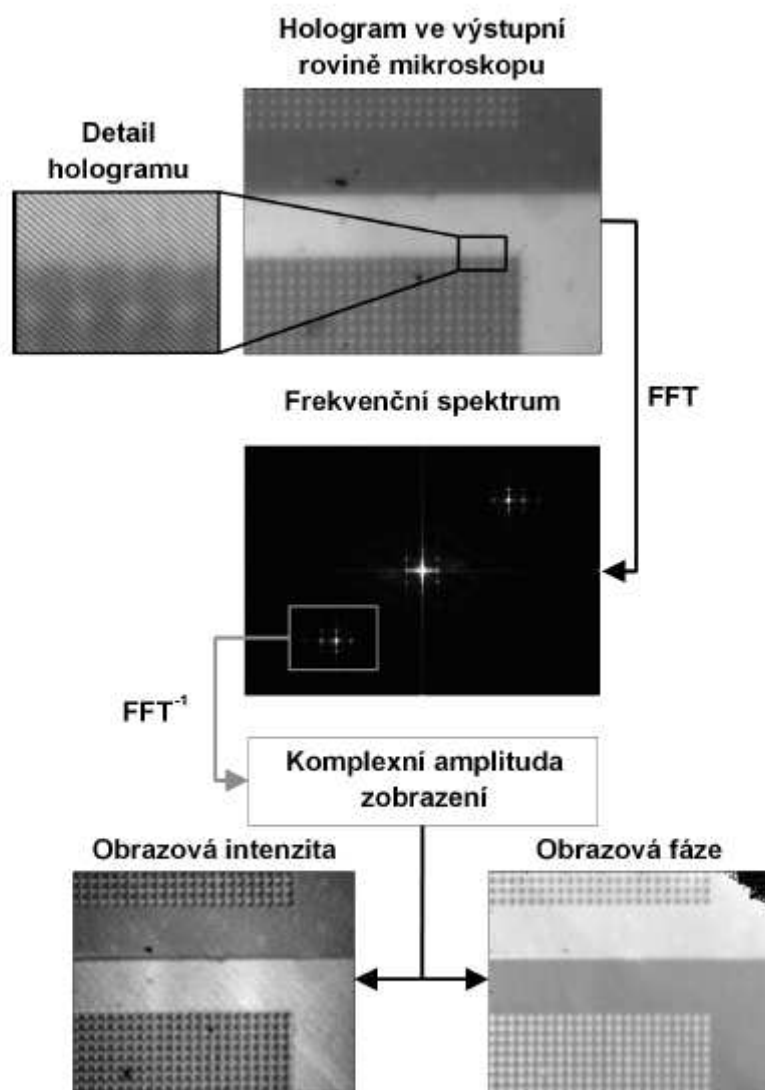
Snímek zaznamenaný CCD kamerou je obrazovým hologramem řezu vzorku předmětovou rovinou, je tvořen soustavou jemných rovnoběžných interferenčních proužků, jejichž kontrast je úměrný amplitudě zobrazení optického řezu.

Holografický obrazec je fourierovsky transformován pomocí algoritmu rychlé Fourierovy transformace – FFT (Fast Fourier Transform). Touto procedurou je získáno spektrum prostorových frekvencí obrazu. Toto spektrum je tvořeno centrálním maximem ve tvaru kříže, který odpovídá součtu autokorelačních funkcí obrazů v referenční a předmětové větvi a dvěma vedlejšími maximy (může být v 1. a 3. kvadrantu nebo v 2. a 4. kvadrantu – podle orientace kamery), která jsou tvořena spektrem prostorových frekvencí zobrazení vzorku posunutým o nosnou frekvenci interferenčních proužků.

Ze spektra prostorových frekvencí je vybrána část obsahující nosnou frekvenci. Aby tato část spektra mohla být odseparována, nesmí se spektra jednotlivých částí překrývat. Proto vybraná část spektra musí splňovat tzv. holografickou podmínku popsanou v této kapitole. Na výřez části spektra, které splňuje holografickou podmínku, je aplikována inverzní FFT. Tím je získána komplexní amplituda zobrazení optického řezu vzorkem. Obrazovou amplitudu lze získat jako modul komplexní amplitudy a obrazová fáze je jejím argumentem. Schéma procesu obrazového zpracování je na obr. 3.2.

Výše popsaným způsobem tedy získáme nejen informaci nesenou obrazovou intenzitou jako u většiny ostatních zobrazovacích metod, ale i informaci nesenou obrazovou fází. Rekonstruovaná fáze pak může být převedena na mapu výšek, nebo může být provedena trojrozměrná rekonstrukce. K tomu stačí pouze jeden snímek. Pokud chceme provést trojrozměrnou rekonstrukci pro struktury s větším výškovým rozdílem, je nutné pořídit řezy vzorkem rovnoměrně odstupňovaným hloubkovým krokem.

Výše popsaným způsobem se získá obraz pocházející pouze z bodů vzorku, které leží v předmětové rovině objektivu a jejím nejbližším okolí (informace z řezu vzorku předmětovou rovinou). To je způsobeno hloubkovou diskriminací intenzity. Zobrazení má tedy vlastnosti podobné vlastnostem konfokálního rastrovacího mikroskopu.



Obrázek 3.5: Schéma zpracování obrazového hologramu ve výstupní rovině reflexního DHM [2].

### 3.3 Holografická podmínka

Pro určení holografické podmínky je třeba popsat vlnu procházející předmětovou a referenční částí a také popsat matematický aparát zpracování obrazu.

Z obrazových ohniskových rovin identických objektivů O1 a O2 se šíří dvě kulové vlny, obrazová  $u_p$  a referenční  $u_r$ . Tyto vlny odpovídají jednomu bodu plošného zdroje. Po projití objektivu dojde k transformaci kulových vln na vlny rovinné. Předpokládejme, že vlnění je monochromatické, tudíž jsou vlny vyjádřeny vztahem

$$u(\vec{r}, t) = u(\vec{r}) \exp(-i\omega t), \quad (3.2)$$

kde  $u(\vec{r})$  je komplexní amplituda,  $\vec{r}$  je polohový vektor,  $t$  je čas a  $\omega$  je úhlová frekvence. Jelikož se úhlová frekvence vlny  $\omega$  při průchodu objektivu nemění, budeme dále počítat jen s prostorovou částí vlny

$$u(\vec{r}) = A \exp(2\pi i \vec{k} \cdot \vec{r}), \quad (3.3)$$

kde  $A$  je amplituda,  $\vec{k}$  je vlnový vektor daný vztahem  $\vec{k} = k \vec{k}_0$ , přičemž  $k = 1/\lambda$  označuje vlnčet a  $\vec{k}_0$  je jednotkový vlnový vektor.  $\lambda$  je vlnová délka světla šířícího se v prostředí o indexu lomu  $n$ . Rovnici (3.3) tak můžeme přepsat do tvaru

$$u(\vec{r}) = A \exp(2\pi i \frac{1}{\lambda} \vec{k}_0 \cdot \vec{r}). \quad (3.4)$$

Zavedme pravouhlý souřadnicový systém  $(x, y, z)$ , přičemž výstupní rovina interferometru je totožná s rovinou  $(x, y)$ . Optická osa předmětové a referenční větve leží s ohledem na zavedený souřadnicový systém v rovině  $(x, y)$ . Mějme rovinnou vlnu, jejíž jednotkový vlnový vektor  $\vec{k}_0$  leží v rovině  $(y, z)$  a zároveň svírá s osou  $z$ , jež je normálou k výstupní rovině, úhel  $\theta/2$ . Pro  $z = 0$  má potom rovnice (3.4) tvar

$$u(y) = A \exp(2\pi i \frac{1}{\lambda} k_{0y} y). \quad (3.5)$$

Dosazením rovnice (1) do (3.6) dostaneme tvar

$$u(y) = A \exp(2\pi i f y). \quad (3.6)$$

Po odrazu prochází rovinné vlny opět objektivu O1 a O2 a transformují se zpět na vlny kulové. Ve výstupní rovině obě vlny spolu interferují a vytváří obraz. Vzhledem k velké vzdálenosti mezi obrazovými ohniskovými rovinami objektivů O1 a O2 a výstupní rovinou (160 mm) a vzhledem k rozměrům pozorovaného pole ve výstupní rovině interferometru (10,2/ $m_3$  mm x 8,3/ $m_3$  mm), kde  $m_3$  je příčné zvětšení objektivu O3, je poloměr křivosti vlnoploch předmětové a referenční vlny velký a vlny můžeme považovat za rovinné. Tyto vlny jsou popsány vztahy

$$u_p(x, y) = a_p(x, y) \exp(-2\pi i f y), \quad (3.7)$$

$$u_r(y) = a_r(y) \exp(2\pi i f y), \quad (3.8)$$

kde  $a_r$  je amplituda referenční vlny, která je, pokud uvažujeme ideální mikroskop, konstantní.  $a_p(x, y)$  je komplexní amplituda předmětové vlny, která vytváří zobrazení.

Intenzita světla ve výstupní rovině mikroskopu má tvar

$$i(x, y) = |u_r(y) + u_p(x, y)|^2, \quad (3.9)$$

$$i(x, y) = |u_r(y)|^2 + |u_p(x, y)|^2 + u_r(y)u_p^*(x, y) + u_p(x, y)u_r^*(y), \quad (3.10)$$

kde symbol  $*$  označuje funkci komplexně sdruženou. Dosazením vztahů (3.7), (3.8) do (3.10) dostaneme pro intenzitu

$$i(x, y) = |u_r(y)|^2 + a_p(x, y)a_p^*(x, y) + a_r a_p^*(x, y) \exp(4\pi i f y) + a_p(x, y)a_r^* \exp(-4\pi i f y). \quad (3.11)$$

První sčítanec v rovnici (3.11) představuje intenzitu referenční vlny. Druhý sčítanec představuje intenzitu předmětové vlny. Třetí (respektive čtvrtý) sčítanec nese informaci o tvaru předmětové vlny, při známém tvaru vlny referenční. To znamená, že z tohoto sčítance lze zrekonstruovat amplitudu i fázi předmětové vlny a proto se dále budeme zabývat pouze tímto sčítancem. Označme součin  $a_p(x, y)a_r^* = \tilde{a}_p(x, y)$ . Pak stejně jako v [11] provedeme Fourierovu transformaci čtvrtého sčítance rovnice (3.11).

(3.12)

$$f_m = \frac{NA}{m\lambda_0}, \quad (3.13)$$
$$NA = n \sin \theta_m, \quad (3.14)$$

hologram

FFT

$A_p = \text{FT} \{a_p\}$

$A_p^* A_p$

$A_p B_p$

$2fm$ ,  $2f$ ,  $fm$ ,  $-fm$ ,  $0$

Dále je z obr. 3.6 patrné, že autokorelace funkce  $A_p$ , umístěná symetricky kolem středu spektra prostorových frekvencí, je ohraničená dvojnásobkem prostorové frekvence  $f_m$ . Vzdálenost středů funkce  $A_p$  a její autokorelace je dána prostorovou frekvencí interferenčních



proužků  $2f$ . Abychom mohli funkci  $A_p$  od její autokorelace separovat, musí být vzdálenost jejich středů větší než  $3f_m$ . Z toho vyplývá holografická podmínka  $2f \geq 3f_m$ .



## Kapitola 4

# Měřicí metoda odrazných povrchů pomocí reflexního DHM

Reflexní DHM lze díky svým zobrazovacím vlastnostem použít jako nástroj pro vysoce přesnou profilometrii povrchů. Zkoumané povrchy lze podle [2] rozdělit do dvou základních skupin.

- 1) Povrchy s malými výškovými změnami v topografii – při měření nedochází k neurčitosti obrazové fáze.
- 2) Povrchy s velkými výškovými změnami v topografii – rozdíly naměřené obrazové fáze přesahují interval  $2\pi$  a při měření dochází k neurčitosti obrazové fáze.

Obě skupiny povrchů jsou podrobně popsány v [2]. Vzhledem k cílům této diplomové práce jež je zaměřena pouze na povrchy s velkými výškovými změnami v topografii, konkrétně na případ, kdy výškový rozdíl horní a dolní úrovně schodku na povrchu vzorku je větší než polovina vlnové délky použitého záření, ale stále menší než pološířka osově intenzitní odezvy mikroskopu a výškový rozdíl mezi horní a dolní úrovní bude skokový.

### 4.1 Postup měřicí metody

Při měření vzorků s povrchovou strukturou, která obsahuje výškové rozdíly odpovídající skoku fáze  $\phi + n2\pi$ , kde  $n$  je neznámé celé číslo, se využívá kombinace zobrazení fáze a obrazové intenzity, která je hloubkově diskriminovaná. Při měření se uplatňuje následující postup navržený v [13], který lze rozdělit do dvou částí.

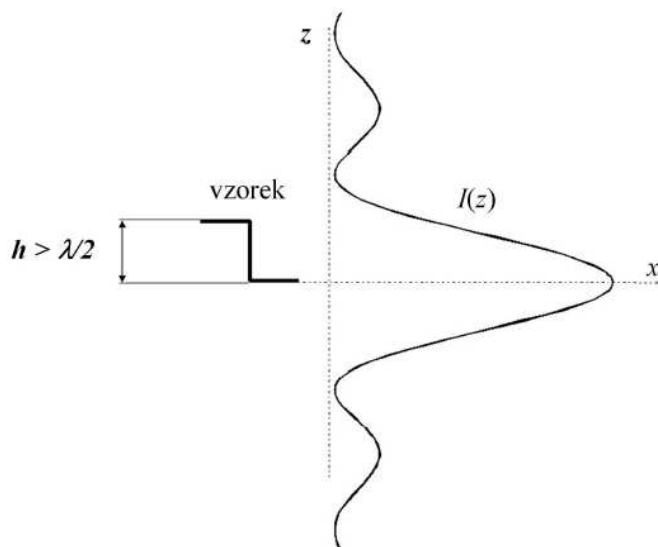
V první části jsou zvlášť naměřeny výškové mapy dolní a horní oblasti metodou měření pro malé výškové změny v topografii.

Ve druhé části měření je stanovena vzájemná vzdálenost hladin nulové výšky obou výškových map. Střed měřicího intervalu je umístěn v dolní oblasti, jak je znázorněno na obr. 4.1. Osy na obrázku jsou značeny  $x$  a  $z$ , kde osa  $z$  je shodná s optickou osou. Intenzita  $I(z)$  je funkce polohy  $z$  a  $h$  je výškový rozdíl horní a dolní úrovně schodku na povrchu vzorku. Protože výškový rozdíl horní a dolní oblasti nepřesahuje pološířku osově intenzitní odezvy, lze z fázového rozdílu určit střední vzdálenost hladin. Nejednoznačnost neznámého čísla  $n$  lze následně určit měřením pomocí hloubkově diskriminované intenzity. Při určování osového posunutí vzorku lze využít středního fázového posuvu všech obrazových bodů. Je však třeba splnit podmínku, aby osová rozlišovací schopnost mikroskopu byla lepší než  $z_{2\pi}$ , které lze podle [2] vyjádřit vztahem

$$z_{2\pi} = \frac{1}{k_0(1 + \cos \alpha)} = \frac{\lambda}{1 + \cos \alpha}. \quad (4.1)$$

Pološířku optického řezu je vhodné rozšířit (zvýšit koherenci zdroje) v případě, kdy chceme pološířkou hlavního maxima hloubkově diskriminované intenzity obsáhnout osově co

nejrozsáhlejší oblast, což je vhodné k získání obecné informace o zkoumaném povrchu. V případě přesného měření je vhodné pološířku hlavního maxima hloubkově diskriminované intenzity zúžit.

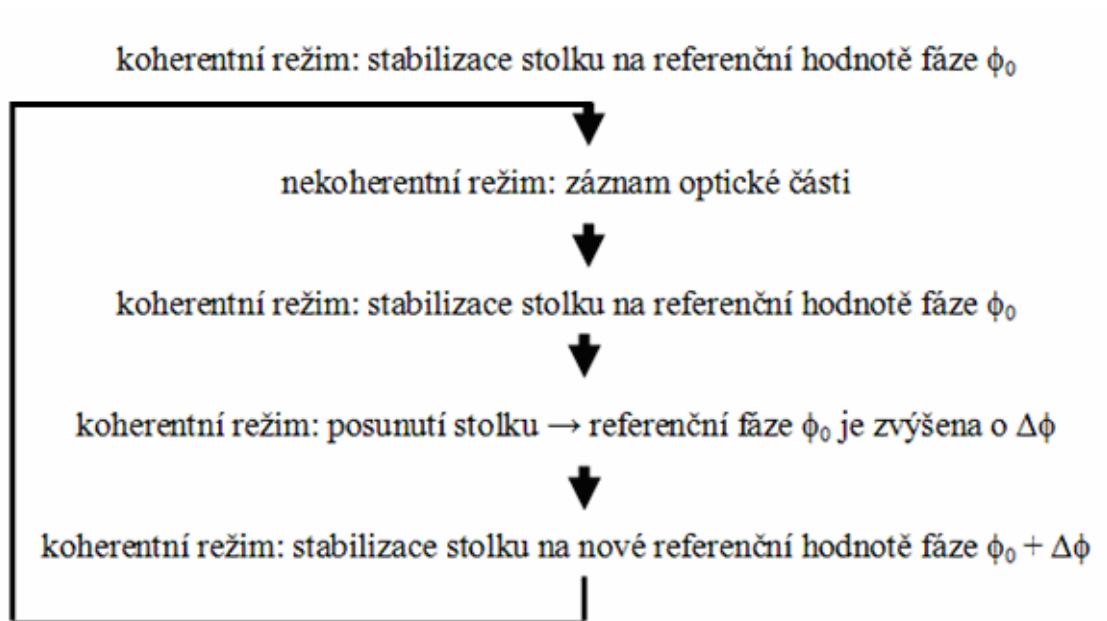


Obrázek 4.1: Schematický náčrt měření s velkými výškovými změnami v topografii povrchu. Výškový rozdíl horní a dolní oblasti nepřevyšuje pološířku osové intenzitní odezvy. Převzato z [2].

## 4.2 Fáze mapovaná hloubkově diskriminovanou intenzitou

Schéma jednoho cyklu získání přesné fázové mapy povrchu vzorku je na obrázku 4.2. Na začátku cyklu je povrch vzorku zobrazen v koherentním módu použitím osvětlení s úzkopásmovým interferenčním filtrem. Mikroskopový stolek je stabilizován na hodnotě referenční obrazové fáze  $\phi_0$ . Z hlediska stabilizace optického vzorku je zásadní, aby rozsah intervalu výšky, který pokrývá pološířka hloubkově diskriminované intenzity v koherentním módu, umožňoval současné zobrazení obou úrovní hluboké povrchové struktury.

V dalším kroku se jednoduše vytáhnutím úzkopásmového interferenčního filtru z optické dráhy světelného svazku přejde do zobrazení v nekoherentním módu. Díky tomu je zobrazena pouze úzká oblast v okolí předmětové roviny s vysokou přesností určení rozložení fáze. V tomto okamžiku je zaznamenán obraz hologramu povrchu vzorku. Následně se vložením úzkopásmového interferenčního filtru zpět do optické dráhy světelného svazku vrátí zobrazení do koherentního módu a opět se stabilizuje na referenční hodnotě obrazové fáze  $\phi_0$ . V dalším kroku se mikroskopový stolek posune o definovanou referenční hodnotu obrazové fáze  $\Delta\phi$  ve směru optické osy a znovu se stabilizuje. Nová referenční hodnota obrazové fáze je dána součtem  $\phi_1 = \phi_0 + \Delta\phi$ . Tím je cyklus uzavřen. Výsledkem je získání komplexní amplitudy povrchu vzorku v přesně definované poloze ve směru optické osy. Tento cyklus se opakuje pro každý fázový krok  $\Delta\phi$  dokud není celá struktura povrchu zaznamenána v celém jejím výškovém rozsahu. Výsledkem tohoto postupu je získání fázové mapy povrchu vzorku s nízkým rozlišením, avšak bez neurčitosti fáze  $n2\pi$ .



Obrázek 4.2: Schematický nákres jednoho cyklu při měření hlubokých povrchů. Převzato z [2] a upraveno.



## Kapitola 5

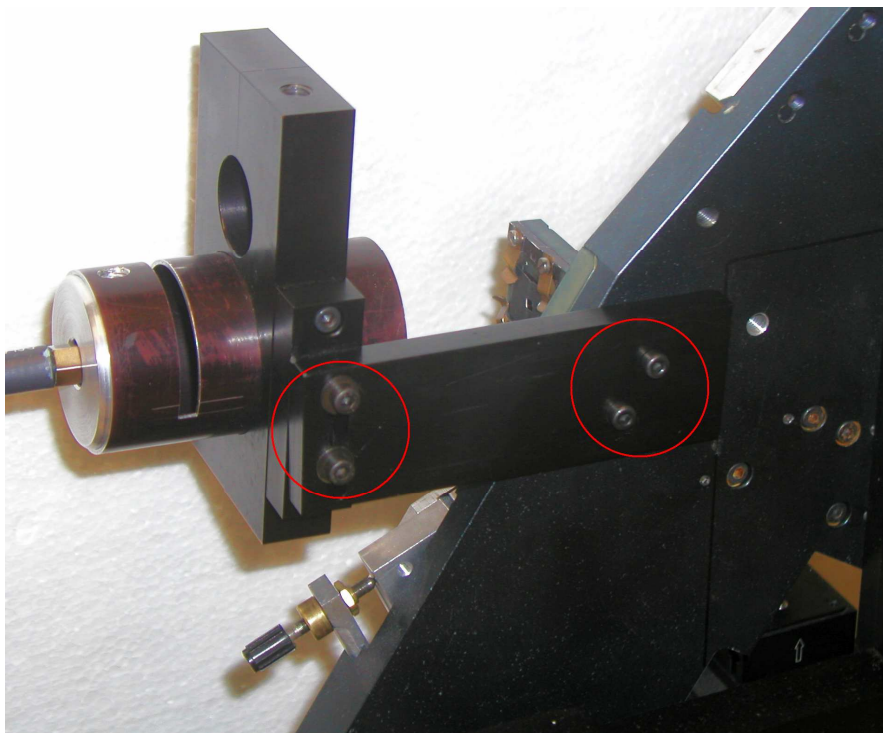
# Konstrukční návrhy a úpravy

Funkčnost výše popsané měřicí metody hlubokých povrchů využívajících ke změně nekoherentního módu na koherentní spektrálně úzkopásmový interferenční filtr byla testována manuálně. Z popisu měřicího postupu, který je uveden v předchozí kapitole vyplývá, že obsluha musí v každém cyklu měření vyjmout a následně vložit interferenční filtr do cesty světelného svazku. Při každém přechodu z nekoherentního módu na koherentní a zpět, je současně třeba manuálně vypnout stabilizaci, zaznamenat obrazový hologram, opět zapnout stabilizaci, dát příkaz k posuvu mikroskopového stolku o definovaný fázový krok a opět stabilizovat. Manuální provedení tohoto postupu vede k velkým časovým prodlevám. Dále se po určité době měření může objevit chyba lidského faktoru a celé měření tak znehodnotit. Tyto problémy lze odstranit plným zautomatizováním uvedené měřicí metody, která pak bude rychlejší a pro obsluhu jednodušší. K tomu bylo třeba učinit na reflexním DHM několik konstrukčních úprav. Tyto úpravy jsou podrobně popsány v této kapitole.

### 5.1 Osvětlovač – původní verze

Konstrukční úpravy nutné pro zautomatizování dané metody se týkaly pouze osvětlovacího systému. Na obrázku 5.1 je původní osvětlovací systém používaný u reflexního DHM. Tento osvětlovač se skládá z držáku vlákna a držáku kolektoru umístěných v tubusu. V tubusu poblíž držáku vlákna je kolmo k ose tubusu zhotovena drážka pro případné vložení rotující matnice. S mikroskopem je tubus připojen prostřednictvím ramene, ke kterému je upevněn pomocí držáku. Nevýhodou tohoto uchycení, znázorněného na obr. 5.1 v kroužcích, je problematické a nepřesné seřízení optické osy osvětlovače s optickou osou mikroskopu způsobené předchozí konstrukcí. Při měření výše popsanou měřicí metodou se ke změně koherence osvětlení používal pouze spektrální filtr, který se manuálně vkládal do optické osy mezi osvětlovač a difrakční mřížku. Clona, byla-li použita, nesloužila k přechodu mezi nekoherentním a koherentním módem, ale pouze k zesílení koherentního módu. To bylo způsobeno jejím uchycením, kdy při jejím vyjmutí a následném vložení bylo prakticky nemožné umístit ji přesně na předchozí místo. Proto nebyla po celou dobu měření vyjmuta.

Požadavky na plné zautomatizování měřicí metody si vyžadují, aby osvětlovací systém obsahoval počítačem řízený měnicí systém spektrálních filtrů a také počítačem řízenou clonu. Vzhledem k poměru velikosti níže popsané počítačem řízené clony k velikosti průměru tubusu by bylo obtížné tuto clonu připojit ke stávajícímu osvětlovači. Z těchto důvodů a z důvodu problematického seřizování a uchycení osvětlovače popsaného výše, bylo rozhodnuto zkonstruovat osvětlovací systém nový.



Obrázek 5.1: Stará verze osvětlovače. V kroužcích je znázorněno uchycení díky kterému je seřizování osvětlovače do správné polohy vůči optické ose problematické a nepřesné.

## 5.2 Konstrukční návrh nové osvětlovací soustavy

Stěžejním kritériem při návrhu konstrukce nové osvětlovací soustavy byla volba měniče clony a volba dubletu na místě kolektoru. Na základě jejich rozměrů (měnič clony), respektive optických parametrů (dublet) se pak odvíjela konstrukce dalších částí.

### 5.2.1 Návrh a konstrukce základních prvků

Mezi základní prvky konstrukce osvětlovací soustavy patří clona, kolektor, matnice a měnící systém spektrálních filtrů. V následujících podkapitolách jsou jednotlivě popsány.

#### 5.2.1.1 Clona

Hlavním parametrem při volbě řídicích mechanismů pro změnu průměru clony byla jednoduchost, malé rozměry, přesnost polohování osy apertur vzhledem k optické ose a přesnost změny průměru apertur. Důležitým kritériem byly také nízké vibrace, které mechanismus clony může způsobovat.

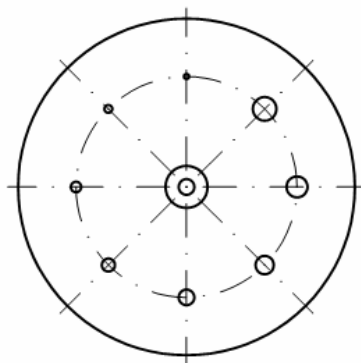
Jeden z prvních návrhů měniče clony je znázorněný na obrázku 5.2. Jedná se o krokový motorek řízený kotouč, který má soustavu apertur o různém průměru pravidelně umístěných na roztečné kružnici. Tato roztečná kružnice leží kolmo k optické ose osvětlovací soustavy. Je-li osa apertury o daném průměru shodná s optickou osou osvětlovací soustavy, pak krokový motorek po určitém počtu kroků, který odpovídá  $n$ -násobku rozteče dvou děr, otočí kotoučem tak, že optická osa je shodná s osou apertury o jiném průměru. Nevýhodou tohoto návrhu je, že převodovka krokového motorku má vůle, a tudíž není zaručeno přesné natočení kotouče. Motorek může taktéž způsobovat vibrace, na které je reflexní DHM citlivý. Z těchto důvodů nebyla tato varianta uskutečněna.

Další dva návrhy měniče clony využívají ke své funkci irisovou clonu jak je znázorněno na obrázcích 5.3 a) a 5.3 b). Oba návrhy využívají, stejně jako návrh předešlý, krokového motorku. V těchto dvou případech však krokové motorky slouží ke změně průměru apertury

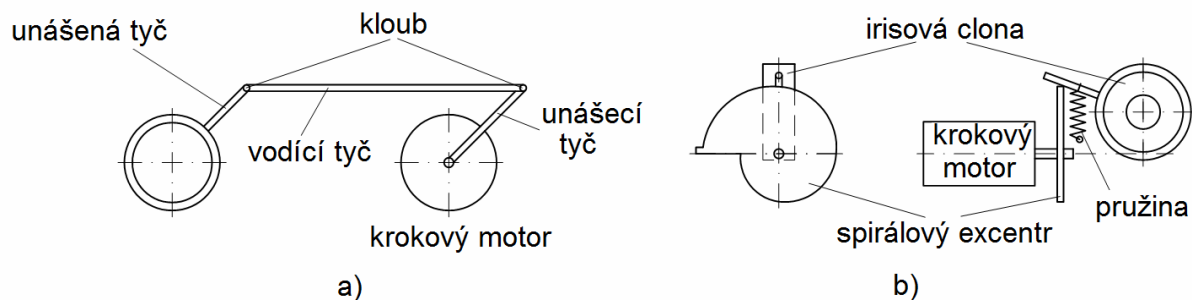


irisové clony. V prvním případě znázorněném na obrázku 5.3 a) je na rameno (unášenou tyč), které otevírá respektive zavírá irisovou clonu, napojena přes kloub vodící tyč, která je přes další kloub spojena s unášecí tyčí přichycenou ke krokovému motorku. V druhém případě, který je na obrázku 5.3 b) je ke hřídeli krokového motorku připojen spirálový excentr, který při otáčení pohybuje s ramenem irisové clonky. Aby se rameno při otáčení pohybovalo směrem dolů je s hřídelem motorku spojeno pružinou, která ho tlačí na spirálový excentr. Tyto dva návrhy mají oproti prvnímu návrhu tu výhodu, že při změně průměru apertur se osa apertur nepohybuje, ale zůstává po celou dobu shodná s optickou osou. Z důvodu vůlí v převodech krokového motorku by bylo problematické správné nastavení požadovaného průměru apertur. Z výše zmíněných důvodů nebyl ani jeden z těchto dvou návrhů realizován.

Na obrázku 5.4 je znázorněn poslední návrh měniče apertury clony. Stejně jako v předchozích dvou návrzích i zde se jedná o irisovou clonu. Tato clona byla součástí zakoupeného CCTV objektivu od firmy JENSEN. Z obrázku je patrné, že tato irisová clona má odlišný tvar od běžně používaných irisových clon. Zatímco běžné clony mají okolo deseti lamel, které dávají přibližně tvar kruhu, tato clona má pouze dvě lamely, které dávají tvar kosodélníku. Pro potřeby měřicí metody popsané v předchozí kapitole však tento tvar irisové clony vyhovuje, protože tato metoda využívá jen dvou poloh apertury clony. Pro použití nekoherentního módu je apertura irisové clony plně rozevřena, a proto má kruhový tvar. Pro použití koherentního módu je apertura clony otevřena do velikosti, dané množstvím projitého světla tak, aby se neprojevil šum. V této velikosti je apertura tvaru kosodélníku. Při pozorování nerovinných vzorků se to projeví rozdílnou prostorovou frekvencí v různých směrech a tím i rozdílným příčným rozlišením. Vzhledem k cílům této diplomové práce, kdy se automatizuje měřicí metoda hlubokých rovinných vzorků, kdy je měřena výšková hodnota dvou úrovní povrchu, však tento tvar vyhovuje. Výhoda konstrukčního řešení této clony oproti všem předchozím návrhům spočívá v jejím ovládání galvanickým mechanismem, který nejenže přímo bez převodu a tudíž bez vůle rozevírá či zavírá tuto clonu, ale také při jeho otáčení nedochází prakticky k žádným vibracím, které by negativně ovlivňovaly zobrazení reflexního DHM. Vzhledem k těmto skutečnostem jsem se rozhodl použít právě tuto irisovou clonu.



Obrázek 5.2: Kotouč se soustavou apertur umístěných pravidelně na roztečné kružnici.



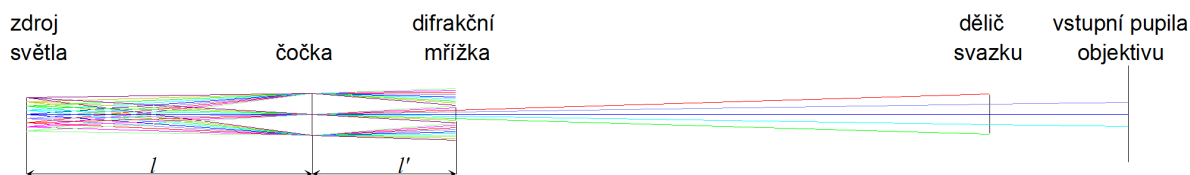
Obrázek 5.3: Schematický náčrt dvou návrhů měniče clony využívající ke své funkci irisovou clonu.



Obrázek 5.4: Irisová clona se zavřenou aperturou, která je použita v osvětlovací soustavě.

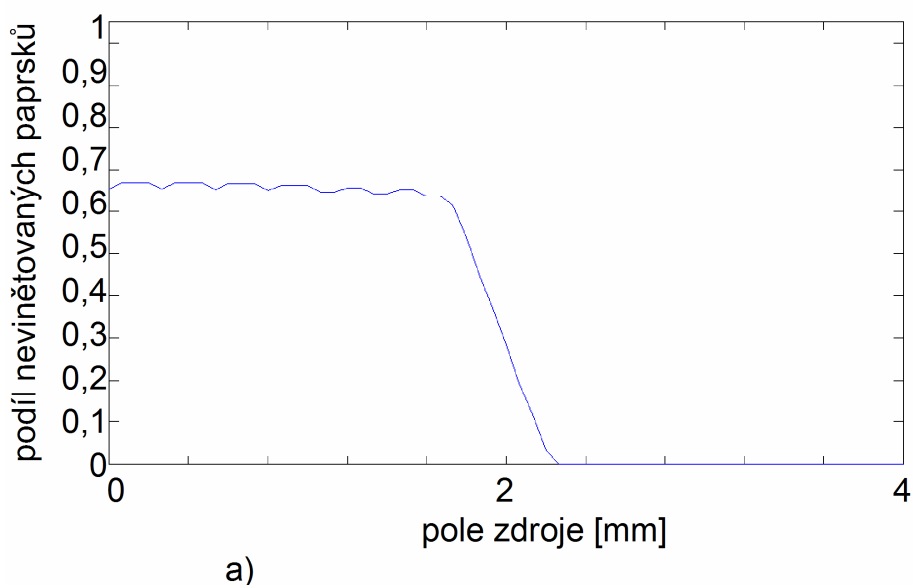
### 5.2.1.2 Kolektor a jeho umístění

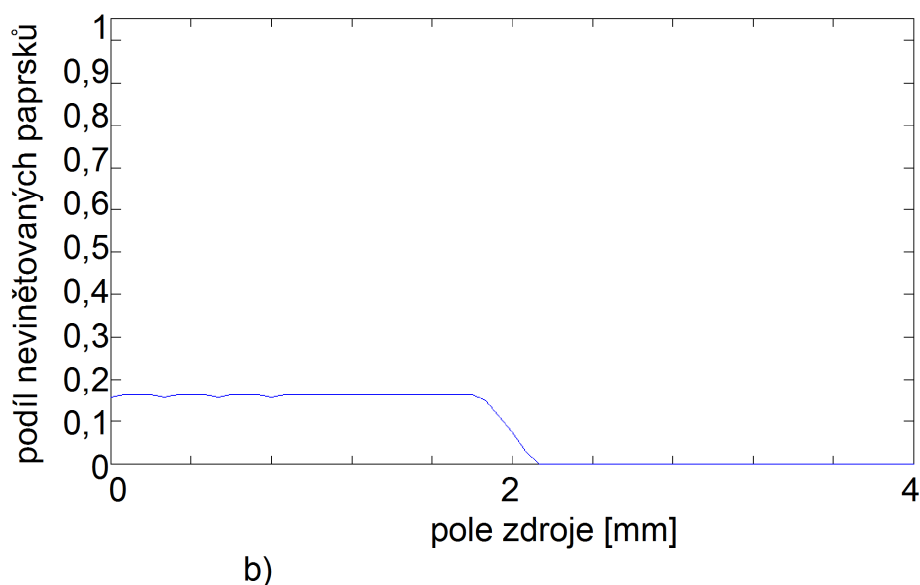
Z dostupných optických prvků Laboratoře optické mikroskopie byl jako vhodný kolektor vybrán dublet o průměru  $d = 12 \text{ mm}$  a ohniskové vzdálenosti  $f' = 50,36 \text{ mm}$ . Optimální poloha dubletu v osvětlovači byla volena na základě výsledků optických analýz zjednodušeného modelu osvětlovací soustavy vytvořeného v programu ZEMAX. Jelikož nebyly známy vnitřní rádiusy dubletu, byl dublet v modelu nahrazen tenkou čočkou a trasován náhodně směřovanými paprsky. Na obrázku 5.5 je schematicky znázorněn chod paprsků osvětlovací soustavou, který byl vytvořen v programu ZEMAX. Zdrojem světla je vysvícená apertura irisové clony popsaná v předchozím odstavci, která má při plném rozevření průměr  $8 \text{ mm}$ . V navrženém modelu byla tato clona nahrazena plošným kruhovým zdrojem o stejném průměru. Vzhledem k tomu, že světelný svazek je vinětován děličem svazku ležícím v obou větvích reflexního DHM, bylo vhodné tuto skutečnost zohlednit i v modelu. To bylo vyřešeno vložením čtvercové apertury o velikosti  $9 \times 9 \text{ mm}$  do vzdálenosti  $33 \text{ mm}$  od pupily objektivu, která má průměr  $8 \text{ mm}$ . Stejným způsobem byla vytvořena i difrakční mřížka. Její rozměry jsou  $3 \times 3 \text{ mm}$  a vzdálenost k pupile objektivu je  $160 \text{ mm}$ . Hodnota vzdálenosti  $l$  od zdroje k dubletu byla volena postupně a optimalizací soustavy pro různé hodnoty  $l$  byla dopočítána vzdálenost  $l'$  dubletu od difrakční mřížky. Nejlepších výsledků z hlediska konstrukčního i optického bylo dosaženo při hodnotě  $l = 68 \text{ mm}$ , kdy vzdálenost dubletu k difrakční mřížce byla  $l' = 34,16 \text{ mm}$ .



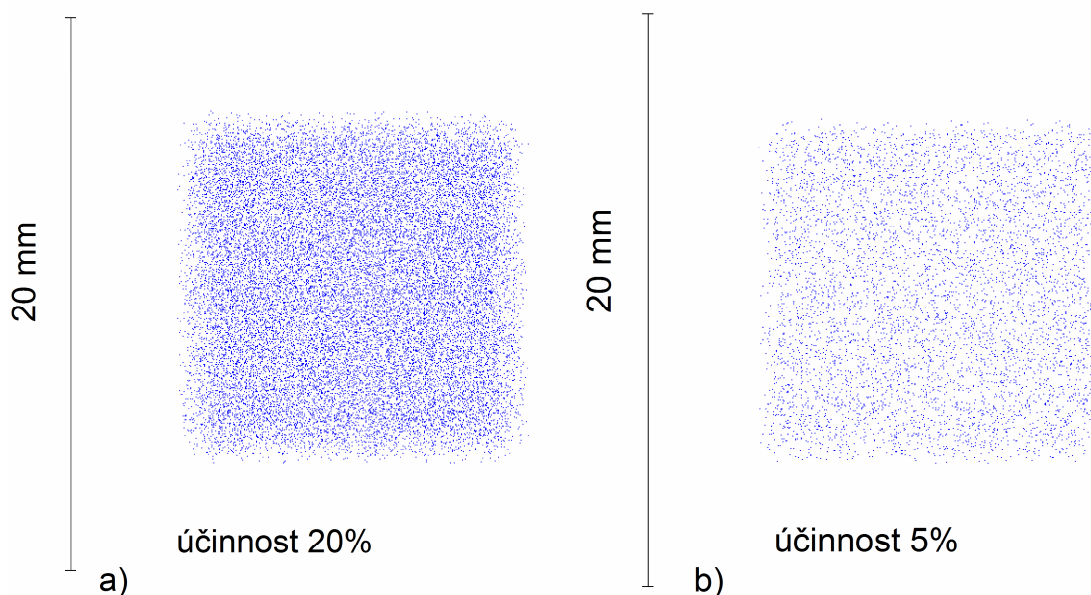
Obrázek 5.5: Schéma chodu paprsků reflexního DHM od zdroje světla ležícího v rovině clony po vstupní pupilu objektivu.

V nejbližší době je plánována u reflexního DHM výměna používané difrakční mřížky o velikosti 3x3 mm za novou difrakční mřížku o velikosti 6x6 mm a stejné frekvenci. Hlavním důvodem k této změně je dosažení většího zorného pole mikroskopu. Proto byla provedena analýza zobrazení, jak se s novou difrakční mřížkou změní chod paprsků při zachování všech ostatních rozměrů. Výsledky analýz, které byly provedeny ve vstupní pupile objektivu, jsou znázorněny na obrázku 5.6 a 5.7, přičemž obrázek 5.6 znázorňuje vinětaci a obrázek 5.7 zobrazuje výsledky geometrické analýzy obrazu. V obou případech výpočet probíhá tak, že z libovolných míst na zdroji jsou vysílány paprsky náhodnými směry. Tyto paprsky jsou poté protrasovány celým optickým systémem až do vstupní pupily objektivu. V případě vinětace program udává, jaká část paprsků a z jaké části zdroje projde optickým systémem do vstupní pupily objektivu. V případě geometrické analýzy obrazu program udává, jak vypadá obraz zdroje po průchodu optickou soustavou a udává také účinnost optického systému. Účinnost optického systému je přitom vyjádřena jako podíl počtu paprsků dopadnuvších do vstupní pupily objektivu vůči celkovému počtu trasovaných paprsků. Z výsledků je patrné, že při použití difrakční mřížky o rozměrech 6x6 mm dopadá do vstupní pupily objektivu 4x více světla (4x vyšší účinnost) než u difrakční mřížky o rozměrech 3x3 mm. Dále je patrné, že podíl nevinětovaných paprsků vycházejících z bodů zdroje vzdálených od jeho středu alespoň 2 mm je nulový. Do výstupní pupily objektivu tedy nedopadají z těchto oblastí zdroje žádné paprsky. To je způsobeno rozměry děliče svazku, který část dopadajícího světelného svazku vinětuje.





Obrázek 5.6: Grafy znázorňující vinětaci paprsků procházejících optickou soustavou znázorněnou na obr. 5.5. Graf na obrázku 5.6 a) znázorňuje průchod optickou soustavou s difrakční mřížkou o rozměrech 6x6 mm, graf na obrázku 5.6 b) znázorňuje průchod optickou soustavou s difrakční mřížkou 3x3 mm.



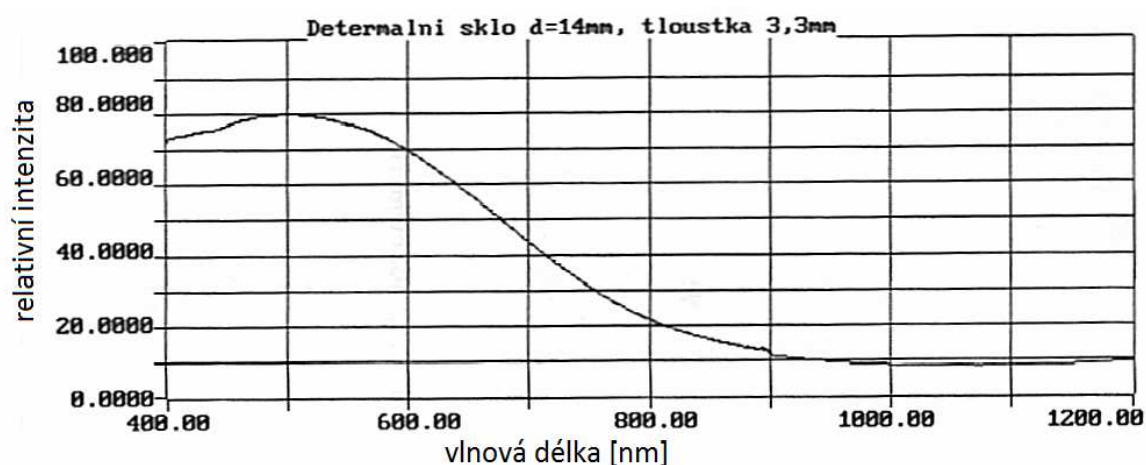
Obrázek 5.7: Výsledky geometrické analýzy obrazu a účinnosti optické soustavy znázorněné na obr. 5.5. a) Obraz zdroje po průchodu optickou soustavou s difrakční mřížkou 6x6 mm. b) Obraz zdroje po průchodu optickou soustavou s difrakční mřížkou 3x3 mm.

### 5.2.1.3 Matnice

V původní verzi osvětlovače byla clona vytvořena černým papírem s dírou. Papír byl umístěn co nejbližší výstupu optického kabelu, aby procházelo co nejvíce světla a tím došlo k úbytku ztrát způsobených rozptylem. Po určitém čase se však v důsledku vysokého tepelného záření papír propálil a tím došlo ke zničení clony. Toto tepelné záření by vzhledem ke konstrukci a materiálu irisové clony použité v nové verzi osvětlovacího systému, mohlo mít nepříznivé následky a mohlo by vést k její deformaci. Proto bylo rozhodnuto použít termální sklo,

kteřé by propouštělo pouze malou nebo vůbec žádnou část infračerveného záření. Spektrální propustnost použitého determálního skla je na obrázku 5.8. Z obrázku je patrné, že v oblasti kolem 800 nm prochází přibližně 20 % záření a se zvyšující se vlnovou délkou propustnost světla klesá pod 10%.

Optický kabel používaný k zavedení světla ze zdroje do osvětlovače reflexního DHM se skládá z jednotlivých vláken. Některá z těchto vláken bývají nefunkční a to se může projevit v nerovnoměrném rozložení intenzity osvětlení. Tento problém lze vyřešit použitím matnice, která světlo vystupující z optického kabelu rozptyluje a tím snižuje význam jednotlivých vláken optického kabelu. Protože se při použití matnice a determálního skla jako samostatných optických prvků zvětšují světelné ztráty, bylo rozhodnuto spojit tyto dva optické prvky a matnici vyrobit z determálního skla. Z hlediska rovnoměrnosti osvětlení vzorku v osvětlovacím systému nám stačí, aby světlo vystupující z optického kabelu bylo jen nepatrně rozptylováno. Proto byl na výrobu matnice použit jemný prášek karbidu křemíku F600, který má rozměr zrna hlavní frakce v rozmezí 10 až 15  $\mu\text{m}$ .



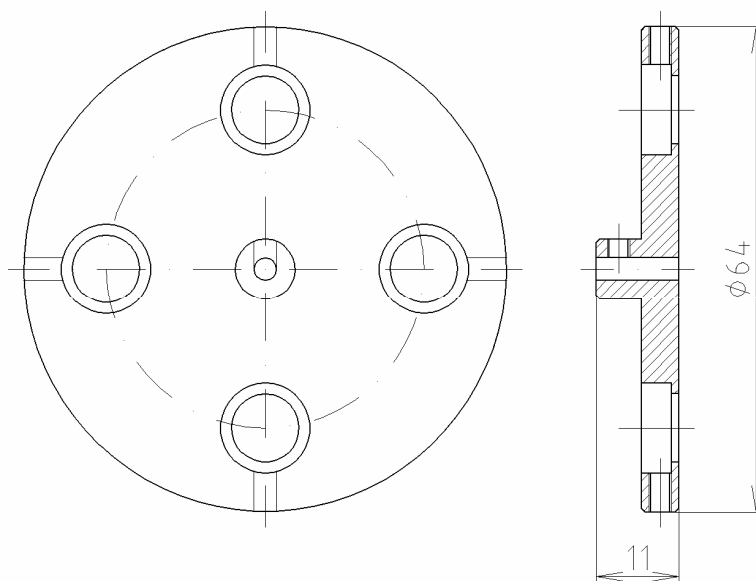
Obrázek 5.7: Spektrální propustnost determálního skla.

#### 5.2.1.4 Měnicí systém spektrálních filtrů

Hlavními parametry při volbě měnicího systému spektrálních filtrů byla stejně jako při volbě clony jednoduchost, malé rozměry, dostatečná přesnost uložení a nízké vibrace, které mechanismus může způsobovat.

Při návrhu měnicího systému filtrů bylo použito podobného konstrukčního uspořádání, jako v prvním návrhu měnicího systému clony. V tomto případě však místo soustavy apertur různého průměru umístěných na roztečné kružnici byly na roztečné kružnici pravidelně po devadesáti stupních umístěny čtyři shodné kruhové otvory (obr. 5.8). Tyto otvory jsou určeny k uložení spektrálních filtrů o průměru  $d = 11,8 \text{ mm}$ , které jsou zajištěny stavěcími šrouby M3. Konec šroubů je opatřen pryží, aby při uchycení nedošlo k poškození spektrálních filtrů. Průměr disku byl zvolen co nejmenší možný na základě průměru tubusu popsaného níže. K otáčení disku je použito stejnosměrného motorku A-max od firmy MAXON. Tyto motorky jsou k dispozici ve dvou verzích s rozdílnými převodovými skříněmi. První verze motorku používá planetovou převodovku s převodovým poměrem 1621:1. Druhá verze používá převodovku s přímým ozubením a převodovým poměrem 126:1. Vzhledem ke stejnému průměru obou verzí motorků lze jednu verzi uchycenou v osvětlovacím systému kdykoliv zaměnit za druhou bez jakýchkoliv konstrukčních úprav.

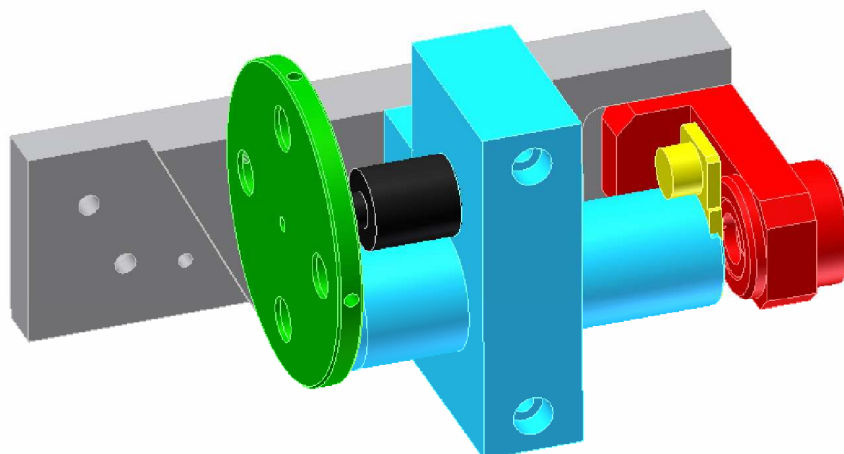
Použití stejnosměrných motorků může způsobovat vibrace a to hlavně při rozběhu a brzdění. Ostatní parametry (malé rozměry, dostatečná přesnost polohování a jednoduchost) by však měly být splněny, proto bylo rozhodnuto tento návrh uskutečnit.



Obrázek 5.8: Kotouč na uložení spektrálně úzkopásmových interferenčních filtrů.

### 5.2.2 Volba a konstrukce dalších prvků

Aby byl osvětlovací systém funkční, musí být základní prvky osvětlovacího systému popsané v podkapitole 5.2.1 spojeny přes jednotlivé konstrukční části do jednoho celku a propojeny s reflexním DHM. Na obrázku 5.9 je model celé osvětlovací soustavy. Tato soustava se skládá z podsestavy 1, do které je veden optický kabel. V této části je umístěna matnice. Dále se soustava skládá z podsestavy 2, která má optický charakter, protože je zde umístění kolektor. K této části je připojena také clona a stejnosměrný motor A-max od firmy MAXON, na kterém je přichycen kotouč pro uložení spektrálních filtrů. Tyto komponenty jsou přichyceny na spojovacím rameni, které osvětlovací systém spojuje s reflexním DHM. Podsestavy 1 a 2 jsou podrobně popsány v následujících podkapitolách.



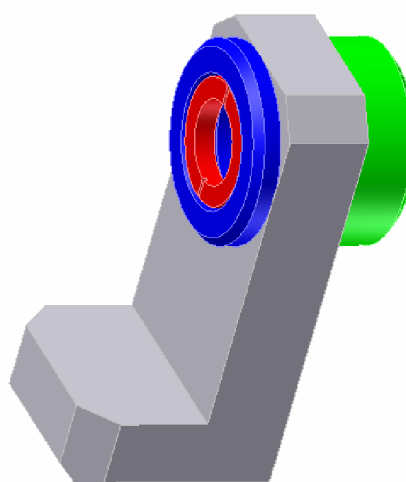
- |  |   |   |
|--|---|---|
| <span style="color: red;">■</span> podsestava 1  | <span style="color: grey;">■</span> spojovací rameno  | <span style="color: yellow;">■</span> clona |
| <span style="color: cyan;">■</span> podsestava 2 | <span style="color: green;">■</span> kotouč na filtry | <span style="color: black;">■</span> motor  |

Obrázek 5.9: Model osvětlovací soustavy.

#### 5.2.2.1 Podsestava 1

Podsestava 1 (obr. 5.10) se skládá z držáku vlákna, držáku matnice a nosného ramene sloužícího k uchycení této podsestavy ke zbytku osvětlovací soustavy. Jednotlivé části a jejich montážní postup jsou popsány níže.

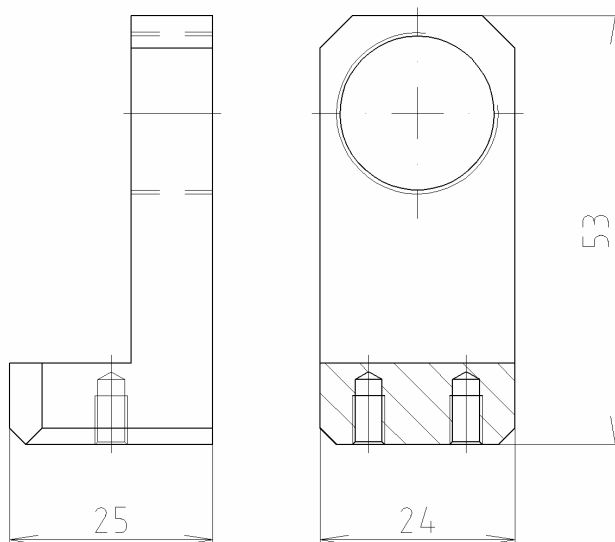
- |                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|
| <span style="color: green;">■</span> | držák vlákna     |
| <span style="color: blue;">■</span>  | držák matnice    |
| <span style="color: red;">■</span>   | závitový kroužek |
| <span style="color: grey;">■</span>  | nosné rameno     |



Obrázek 5.10: Model podsestavy 1.

## Nosné rameno

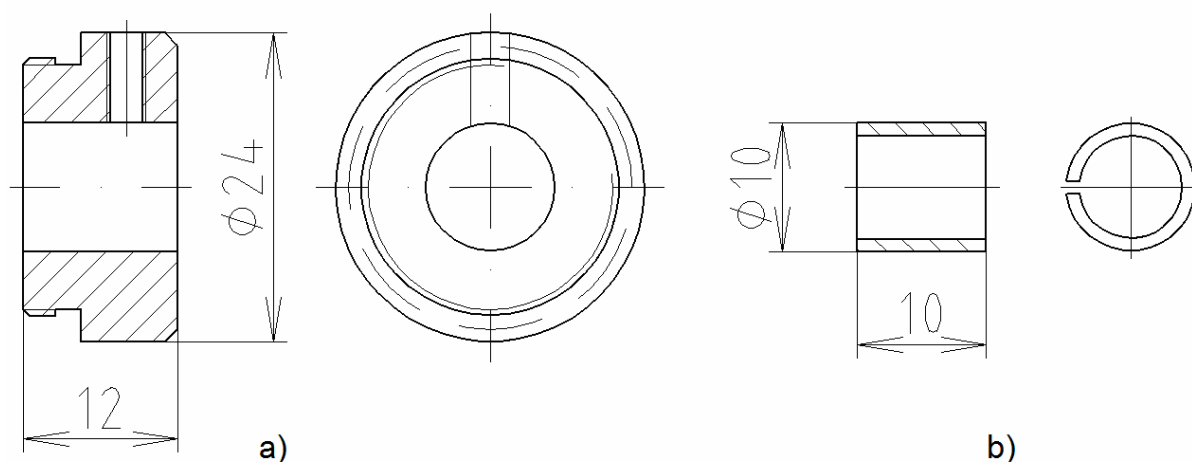
Nosné rameno (obr. 5.11) slouží ke spojení držáku vlákna a držáku matnice se zbytkem osvětlovací soustavy. Vnitřní závit M20 slouží k uchycení držáku vlákna z jedné strany a držáku matnice ze strany druhé tak, jak je znázorněno na obrázku 5.10. Vnitřní závit musí být přesně umístěn, aby se jeho osa shodovala s optickou osou mikroskopu. Dva vnitřní závity M4 slouží ke spojení nosného ramene s ramenem spojovacím (viz obr. 5.9).



Obrázek 5.11: Schematický náčrtek nosného ramene. Uvedené hodnoty jsou v mm.

## Držák vlákna

Na obr. 5.12 a) je zobrazen držák vlákna. Vnější závit M20 slouží k uchycení držáku na nosném rameni. Vnitřní závit M3 slouží k zajištění redukčního přitlačného kroužku, který je na obr. 5.12 b). Průměr vnitřní díry je o jednu desetinu milimetru větší, než vnější průměr redukčního přitlačného kroužku, tudíž do sebe jdou zasunout. Redukční přitlačný kroužek je po celé své délce rozřezán a slouží jako přitlačná pružina. Uchycení optického vlákna v držáku je následující. Optické vlákno se uloží v redukčním přitlačném kroužku a následně se zasune do držáku vlákna. Poté se zajistí šroubem M3, čímž dojde k stlačení redukčního přitlačného kroužku, a tím k uchycení vlákna.

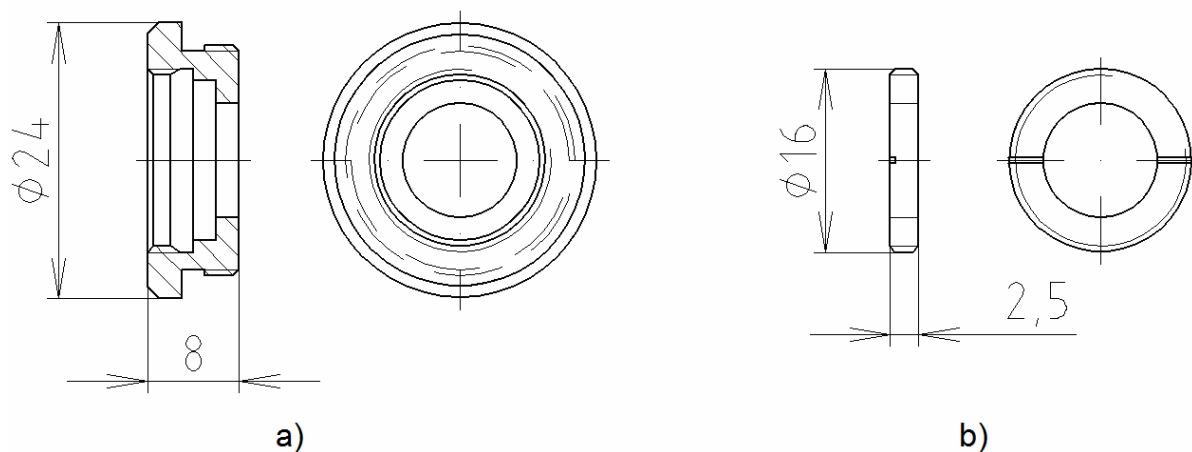


Obrázek 5.11: Schematický náčrtek držáku vlákna (5.11 a)) a redukčního přitlačného kroužku (5.11 b)). Uvedené hodnoty jsou v mm.



## Držák matnice

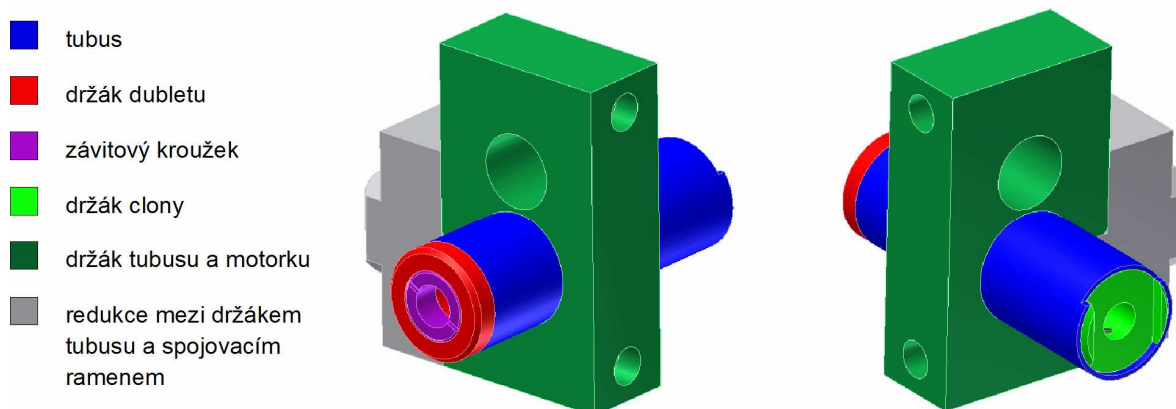
Držák matnice na obr. 5.12 a) se používá k uchycení matnice popsané v podkapitole 5.2.1.3, která se zajistí závitovým kroužkem (obr. 5.12 b)). K tomu slouží vnitřní závit M16. Vnější závit M20 slouží k uchycení držáku matnice na nosném rameni. Drážka na závitovém kroužku je určena pro snadnější montáž a demontáž.



Obrázek 5.12: Schematický nákres držáku matnice (5.12 a)) a závitového kroužku (5.12 b)). Uvedené hodnoty jsou v mm.

### 5.2.2.2 Podsestava 2

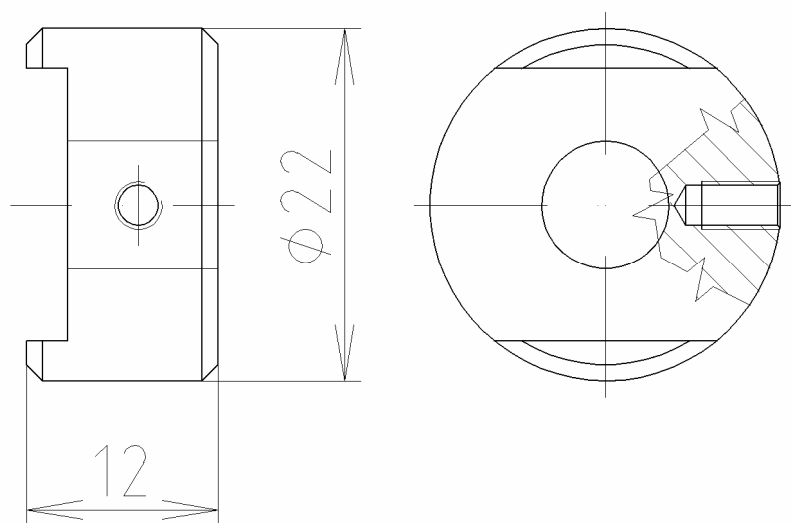
Podsestava 2 se skládá z tubusu, ke kterému jsou uchyceny držák dubletu a držák clony. Dále se skládá z držáku tubusu a redukce, která spojuje podsestavu 2 se spojovacím ramenem. Z obrázku 5.13, na němž je model podsestavy 2 zachycený ze dvou stran, je patrné, jak jsou k sobě jednotlivé konstrukční prvky přichyceny. Tyto konstrukční prvky jsou popsány níže.



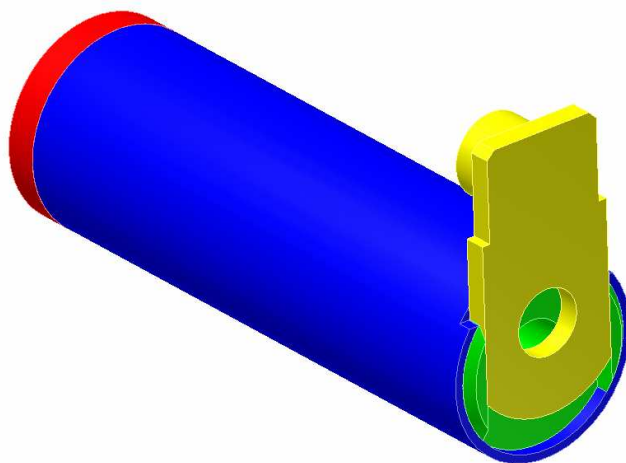
Obrázek 5.13: Model podsestavy 2. Přední a zadní pohled.

## Držák clony

Na obrázku 5.14 je zobrazen držák clony. Vnitřní závit slouží k uchycení držáku v tubusu, znázorněném na obr. 5.16. Vnitřní drážka slouží k ustavení clony, popsané v podkapitole 5.2.1.1. Její rozměr je právě takový, jako je šířka clony a proto je vůle mezi držákem a clonou minimální. Drážka clonu vystředí pouze v jednom směru a k tomu aby byla osa clony totožná s optickou osou, je třeba zajistit ještě jeden směr. Tento směr je zajištěn díky tubusu. Z modelu podsestavy 2 na obrázku 5.13, modelu uchycení na obrázku 5.15 a z obrázku tubusu 5.17 je patrné, že tubus má zhotovenou drážku pro umístění clony pouze z jedné strany. To umožní přitlačit clonu ke straně, kde drážka není (obr. 5.15). Tím se vystředí druhý směr a clona se nachází v poloze, ve které je zajištěna.



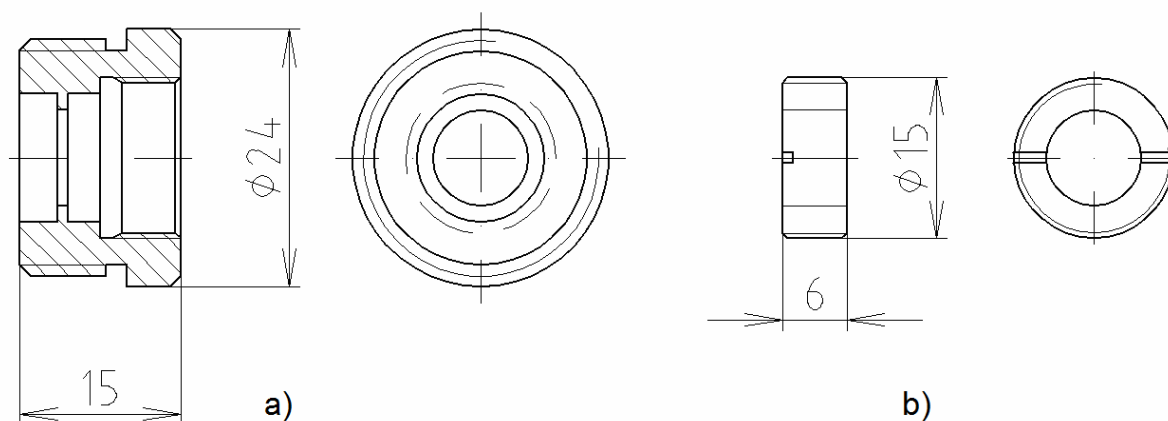
Obrázek 5.14: Schematický náčrt držáku clony. Uvedené hodnoty jsou v mm.



Obrázek 5.15: Model zobrazující uchycení clony. Clona (žlutá barva) je dotlačena na vnitřní plochu tubusu (modrá barva) a v této pozici je přilepena k držáku clony (zelená barva). Červeně je zobrazen držák dubletu.

## Držák dubletu

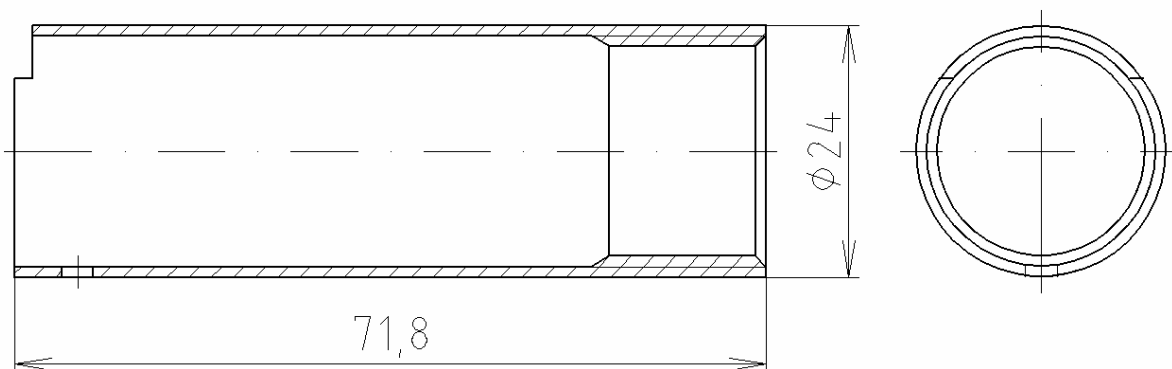
Dublet uložený v držáku dubletu na obr. 5.16 a) je zajištěn závitovým kroužkem (obr. 5.16 b)). Vnější závit M22 na držáku čočky slouží k jejímu uchycení v tubusu znázorněném na obr. 5.17. Drážka na závitovém kroužku zajišťuje snadnější manipulaci.



Obrázek 5.16: Schematický náčrtek držáku čočky (5.16 a)) a závitového kroužku (5.16 b)). Uvedené hodnoty jsou v mm.

## Tubus

Průměr tubusu (obr. 5.17) byl volen na základě velikosti clony, přičemž byla upřednostňována co nejmenší hodnota. Velikost průměru totiž přímo úměrně zvětšuje průměr kotouče se spektrálními filtry. Délka tubusu je volena podle výpočtu v programu ZEMAX. Na jedné straně tubusu je vnitřní závit M22, který slouží k upevnění držáku dubletu. Na druhé straně tubusu je díra, přes kterou je pomocí šroubu M3 upevněn držák clony. Také je zde zhotovena drážka pro volný průchod části clony (viz obr. 5.9).

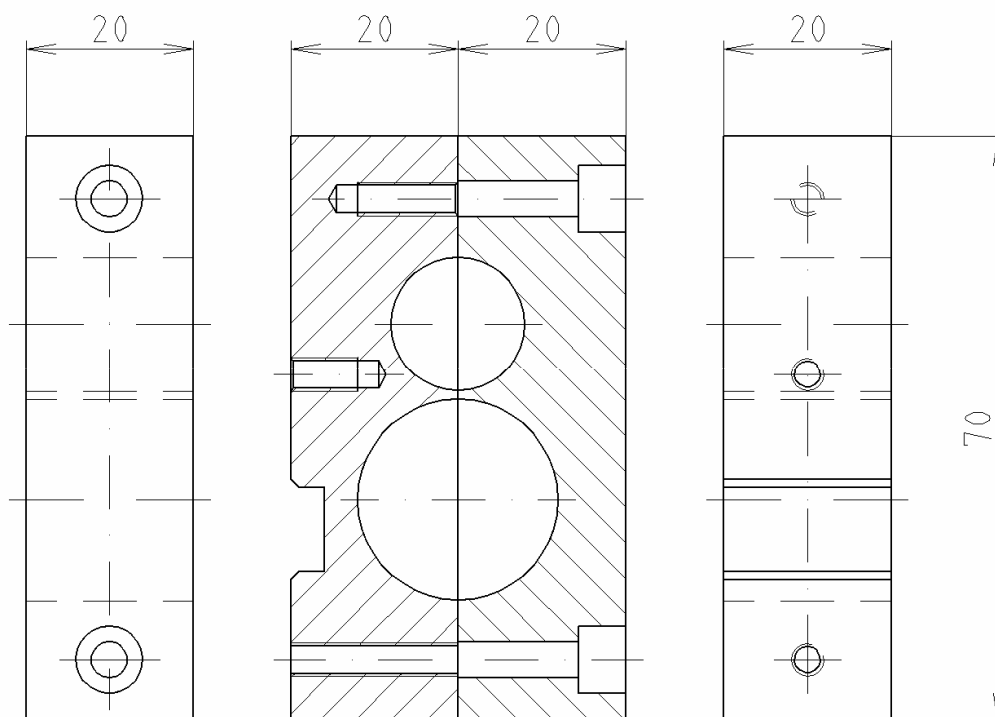


Obrázek 5.17: Schematický náčrtek tubusu. Uvedené hodnoty jsou v mm.

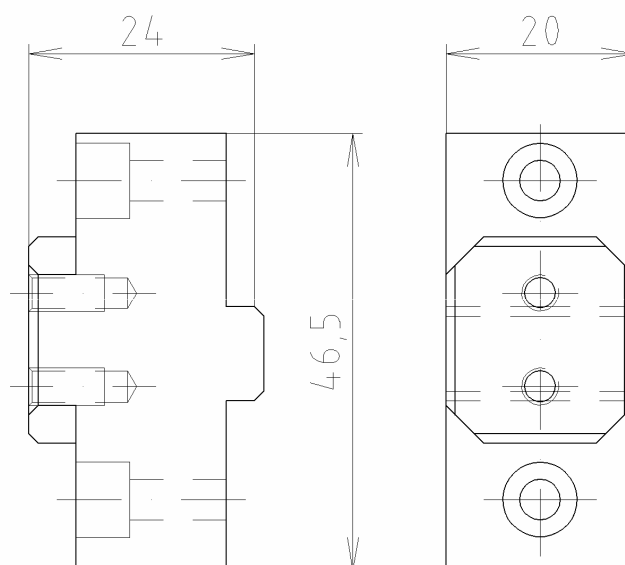
## Držák tubusu a motorku

Držák tubusu a motorku (obr. 5.18) slouží pro uchycení stejnosměrného lineárního motorku od firmy A-max a tubusu v osvětlovacím systému. Tubus je uchycen v takové poloze, že jeho optická osa je shodná s optickou osou mikroskopu. Jak je patrné z obrázku, skládá se držák ze dvou částí, které jsou sešroubovány k sobě pomocí dvou šroubů M4. Uprostřed sešroubovaného držáku jsou dva kruhové otvory. Větší kruhový otvor slouží pro uchycení

tubusu a menší kruhový otvor pro uchycení motorku. Vzdálenost středů těchto dvou děr je taková, že optická osa spektrálního filtru ležícího na kotouči připevněném k motorku je shodná s optickou osou tubusu a tím i optickou osou mikroskopu. Drážka na levé straně držáku slouží pro přesné výškové ustavení držáku vůči redukci (obr. 5.19). Po ustavení je držák k redukci přišroubován dvěma šrouby M4. Redukce slouží jako spojovací článek mezi držákem a spojovacím ramenem a zajišťuje správnou polohu držáku vůči optické ose mikroskopu. Ke spojovacímu rameni je redukce připevněna dvěma šrouby M4.



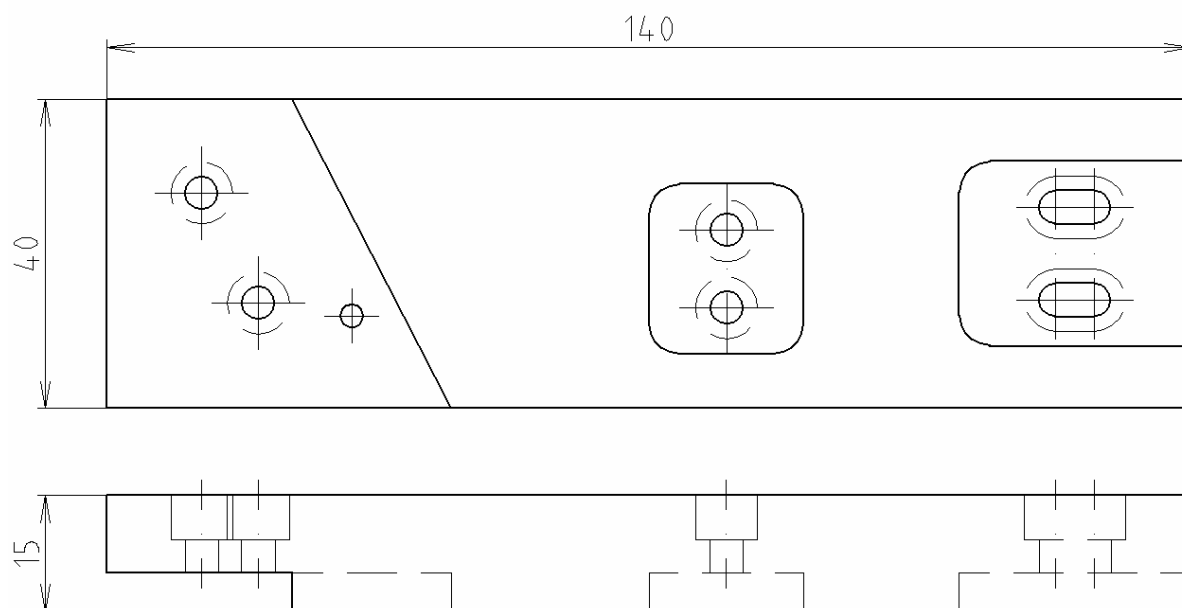
Obrázek 5.18: Schematický náčrtek držáku tubusu a motorku. Uvedené hodnoty jsou v mm.



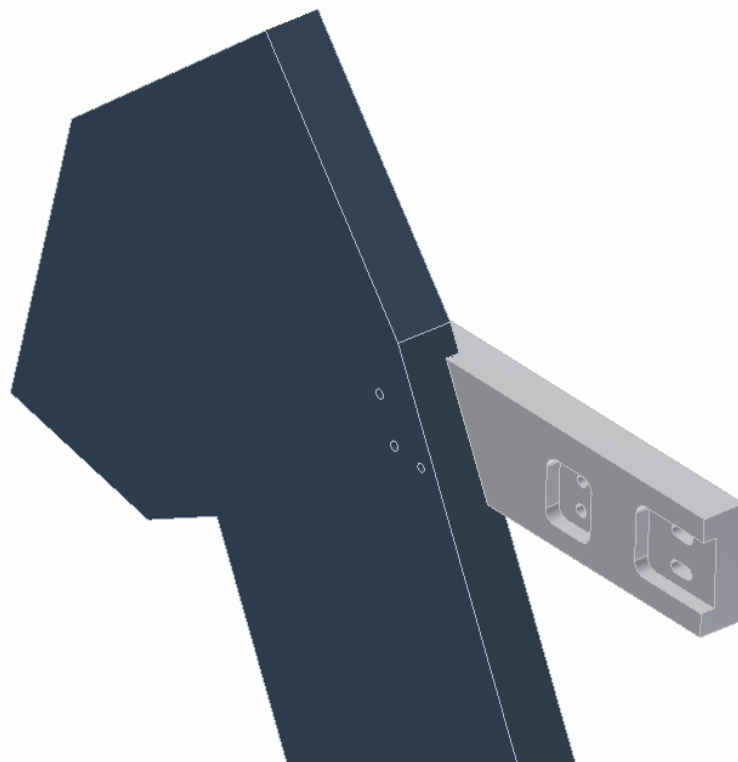
Obrázek 5.19: Schematický náčrtek redukce mezi držákem tubusu a motorku a spojovacím ramenem. Uvedené hodnoty jsou v mm.

## Spojovací rameno

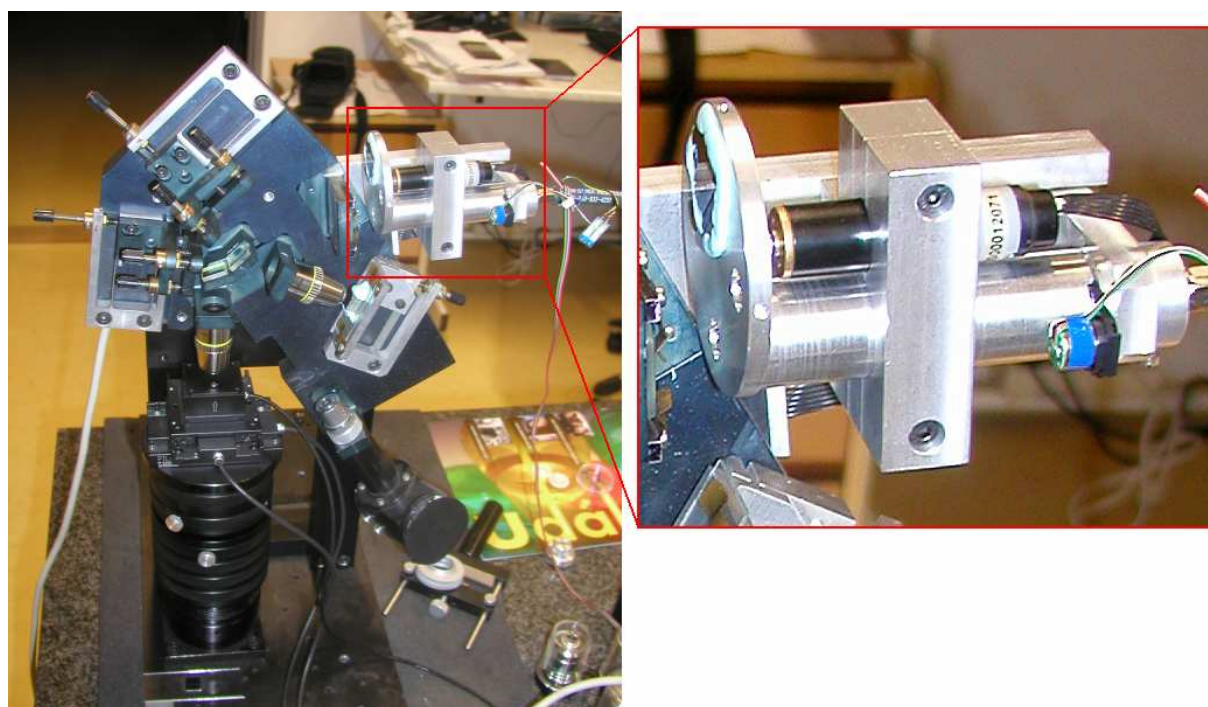
Na obr. 5.20 je schematický náčrtek spojovacího ramene. Toto rameno slouží ke spojení osvětlovací soustavy s mikroskopem. Drážka umístěná vpravo na obrázku je určena pro spojení nosného ramene s ramenem spojovacím (viz obr. 5.9). Díky konstrukci drážky lze nosným ramenem pohybovat a ustavit ho v potřebné poloze. Například při použití rotující matnice je nosným ramenem posunuto tak, aby vznikla mezi irisovou clonou a držákem matnice mezera, sloužící pro umístění rotující matnice. Pokud není rotující matnice použita je nosné rameno posunuto tak, aby se držák matnice dotýkal clony, čímž dojde k omezení ztráty světla. Nosné rameno je ve spojovacím rameni upevněno pomocí dvou šroubů M4. Drážka zhotovená uprostřed spojovacího ramene slouží pro upnutí redukce mezi držákem tubusu a motorku a spojovacím ramenem (obr. 5.19). Redukce je ke spojovacímu rameni připevněna dvěma šrouby M4. Ke spojení spojovacího ramene se základní deskou mikroskopu je určena drážka, zhotovená pod úhlem (obr. 5.20 vlevo), díra na kolík o průměru 3 mm a dvě díry pro šrouby M4. Na obr. 5.21 je toto spojení názorně zobrazeno. Protože konstrukce tohoto spojení nedovoluje případné seřízení, je nutné aby drážka i díra pro kolík byly zhotoveny s velkou přesností a ve správné poloze. Proto byla tato součást vyrobena na počítačem řízené CNC frézce, která díky svému přesnému odečítání polohy byla schopna součást dostatečně přesně vyrobit.



Obrázek 5.20: Schematický náčrtek spojovacího ramene. Uvedené hodnoty jsou v mm.



Obrázek 5.21: Model zobrazující uchycení spojovacího ramene se základní deskou mikroskopu.



Obrázek 5.22: Fotografie osvětlovací soustavy připojené k reflexnímu DHM.

Na obrázku 5.22 je fotografie zkonstruované a sestavené osvětlovací soustavy připojené k reflexnímu DHM. Na kotouči sloužícím k uchycení spektrálních filtrů je patrné provizorní uchycení neutrálního spektrálního filtru, který byl použit v experimentálním ověření měřící

metody popsané v následující kapitole. Jeho funkce spočívá ve snížení intenzity světla v nekoherentním módu, kdy je z důvodů plně rozevřené apertury clony a absenci spektrálního filtru čip CCD kamery přesvětlen. Jeho použitím se docílilo přibližně stejné hodnoty intenzity v obou módech.





## Kapitola 6

# Experimentální prověření automatizace

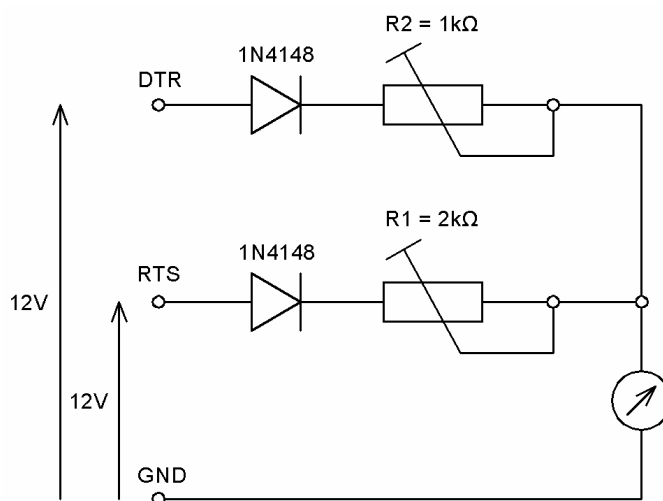
Pro ověření funkčnosti navrhnutého a zkonstruovaného osvětlovacího systému, jenž odpovídá požadavkům na plné zautomatizování měřicí metody uvedené a popsané v kapitole 4, bylo nutné provést experiment na vhodném vzorku. Před experimentem samotným jsou v této kapitole popsány také způsoby zapojení a řízení clony a lineárního motorku. Dále je zde popsán PID regulátor, potřebný pro stabilizaci mikroskopového stolku v přesné osové poloze. V závěru této kapitoly jsou popsány konstrukční úpravy pro zlepšení a zefektivnění procesu měření.

### 6.1 PID regulátor

Ke stabilizaci piezoelektricky ovládaného mikroskopového stolku (piezo-stolku), která je nutná při procesu měření, se používá číslicového PID (Proportional Integral Derivative) regulátoru. Jeho výhodou oproti ostatním číslicovým regulátorům je nulová odchylka v ustáleném stavu a také rychlejší reakce na změnu požadovaného signálu [7]. Regulátor je realizován jako součást obslužného programu, která zajišťuje v průběhu rekonstrukcí reakce piezo-stolku na právě vypočtenou hodnotu obrazové fáze.

### 6.2 Zapojení a řízení clony

Irisová clona popsaná v podkapitole 5.2.1.1 je řízena osobním počítačem pomocí sériového portu RS232. K úpravě řídicího signálu slouží obvod, jehož schéma je znázorněno na obr. 6.1. Obvod se skládá ze dvou identických diod a dvou odporových trimrů, přičemž první trimr má odpor  $R1 = 2k\Omega$  a druhý  $R2 = 1k\Omega$ . DTR, RTS a GND na schématu značí připojení obvodu ke třem kolíkům portu RS232. DTR (data terminal ready) a RTS (Ready to send) slouží k řízení přenosu a GND (ground) slouží pro uzemnění.



Obrázek 6.1: Schematické znázornění obvodu sloužícího k úpravě řídicího signálu irisové clony.

Ovládání clony je v počítači realizováno jako součást programu pro obsluhu reflexního DHM. Vzhledem k tomu, že pohyb galvanického mechanismu ovládajícího aperturu clony má hysteretní charakter, pracuje program tak, že při každé změně apertury dojde nejdříve k jejímu úplnému zavření. Tím se hystereze potlačí a apertura se otevře v požadované poloze.

### **6.3 Zapojení a řízení stejnosměrného lineárního motorku**

Stejnosměrný lineární motorek od firmy MAXON popsán v podkapitole 5.2.1.4 je řízen řídicí jednotkou s mikročipem Intel® 8051 napojenou přes sériový port RS232 k osobnímu počítači. Původně bylo zamýšleno použití motorku s převodovkou s přímým ozubením a převodovým poměrem 126:1. Toto uspořádání má oproti motorku s planetovou převodovkou o převodovém poměru 1621:1 tu výhodu, že se otáčí rychleji. Po prvních testech však bylo rozhodnuto použít motorek s planetovou převodovkou. Důvodem k této volbě byla jednak setrvačnost kotouče se spektrálními filtry, ale hlavně se při zadaném stejném počtu kroků kotouč otáčel o rozdílný úhel. Díky těmto skutečnostem bylo problematické natočit spektrální filtr tak, aby jeho osa byla shodná s optickou osou mikroskopu. Z důvodu vysokého převodového čísla planetové převodovky došlo ke zlepšení těchto nepříznivých vlivů. Nikoliv však k jejich úplnému potlačení. Zároveň ale také došlo ke snížení rychlosti otáčení. To se projeví v celkovém čase experimentálního měření popsaného níže.

## **6.4 Experiment**

### **6.4.1 Parametry experimentální sestavy**

Parametry nastavení reflexního DHM při experimentu byly následující:

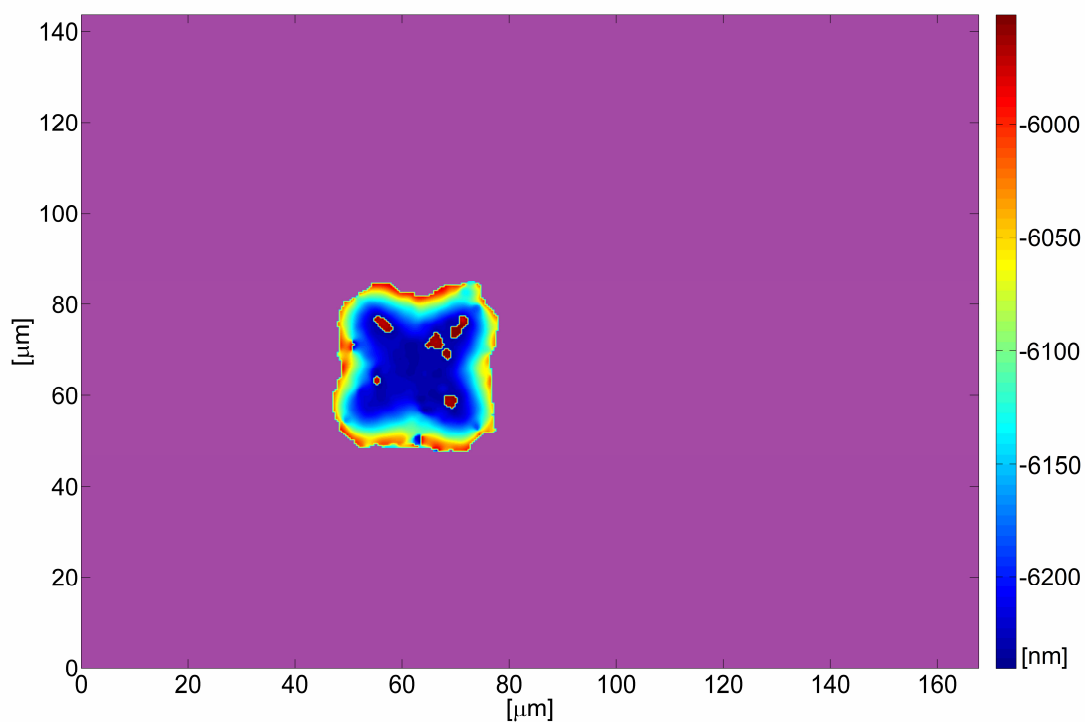
- Objektivy Nikon Plan 10x/0,25.
- Jako zdroj světla byla použita halogenová žárovka o výkonu 150W. V případě koherentního módu byl použit spektrální filtr s maximem propustnosti na vlnové délce  $\lambda = 550 \text{ nm}$  a pološířkou maxima  $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ .
- Třísosý piezoelektrický mikroskopový stolek od firmy Physik Instrumente (PI).
- Digitální kamera Astropix 1.4 o maximálním rozlišení 1392x1040 pixelů a maximální rychlosti snímání 12 snímků za vteřinu (při plném rozlišení).
- Počítač IntelCore™2 QUAD 6600.

### **6.4.2 Průběh experimentu**

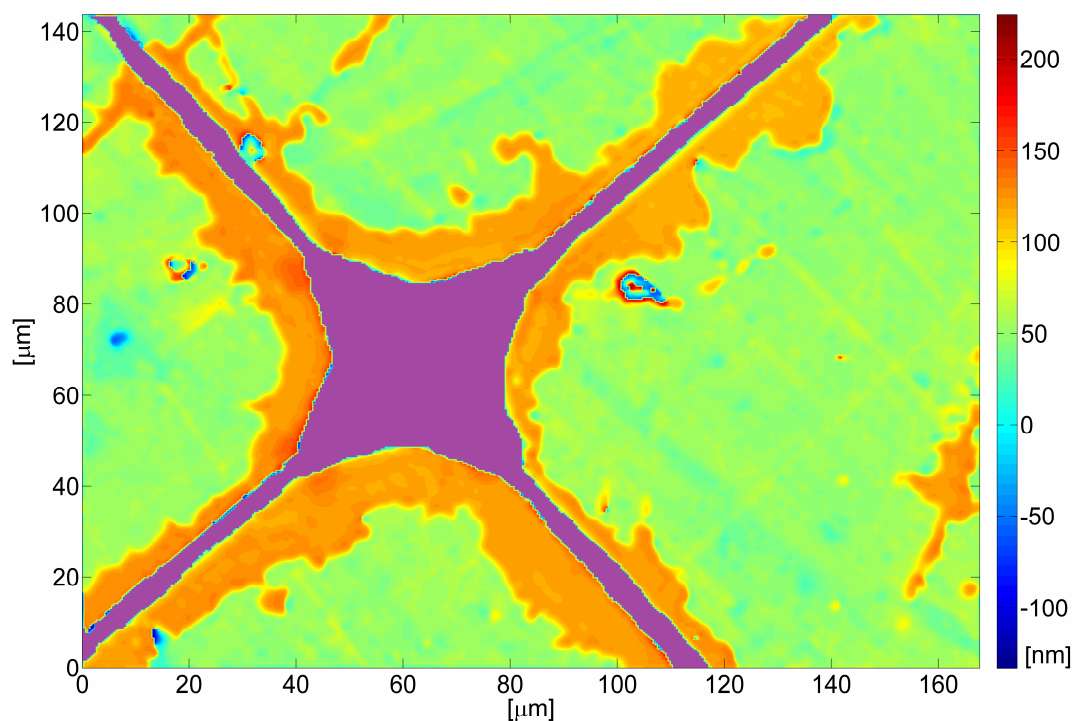
Experiment byl proveden na křemíkovém vzorku, na kterém byla vyleptána struktura. Před samotným měřením křemíkového vzorku byl proveden a vyhodnocen záznam referenční plochy postupem uvedeným v [14]. Referenční plochou se podle [14] rozumí fázový obraz ideálního zrcadla umístěného v předmětové větvi mikroskopu na místě vzorku. V takovém případě jsou veškeré deformace výsledného fázového zobrazení způsobeny pouze členy optické soustavy mikroskopu (difrakční mřížka, objektivy, optika kamery, děliče svazku) a tvarem referenčního zrcadla umístěného v referenční větvi mikroskopu. Zaznamenaná referenční plocha byla použita při zpracování naměřeného křemíkového vzorku.

Postup měření hlubokých povrchů byl podrobně popsán v podkapitole 4.1. Fázová mapa s nízkým rozlišením, získaná z řezů fázového zobrazení hloubkově diskriminovanou intenzitou, neobsahuje fázovou neurčitost  $n2\pi$ . To je způsobeno definovaným fázovým krokem mezi jednotlivými řezy fázového zobrazení. Hodnota fázového kroku proto musí být menší než  $2\pi$  aby nedošlo k fázové neurčitosti. V našem případě byla zvolena  $\Delta\phi = \pi/4 \text{ rad}$ . Na fázovou mapu s nízkým rozlišením se naituje fázová mapa horní a dolní oblasti, která vykazuje vysoké podélné rozlišení, ale také fázovou neurčitost  $n2\pi$ . Parametrem fitování bylo

celé číslo  $n$ . Tím dojde k odstranění fázové neurčitosti mezi horní a dolní úrovní



Obrázek 6.2: Výsledná výšková mapa spodní oblasti po odstranění neurčitosti fáze. Fialová barva označuje oblasti vyloučené z rekonstrukce obrazu z důvodu nízké úrovně signálu.



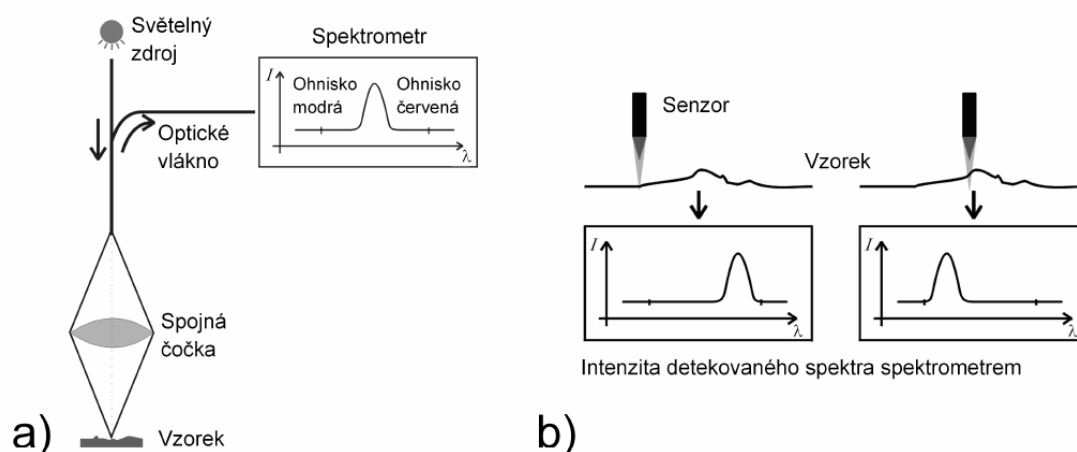
Obrázek 6.3: Výsledná výšková mapa horní oblasti po odstranění neurčitosti fáze. Fialová barva označuje oblasti vyloučené z rekonstrukce obrazu z důvodu nízké úrovně signálu.

vzorku. Před nafitováním jsou fázové mapy s nízkým i vysokým rozlišením vyrovnány a od fázové mapy s vysokým rozlišením je navíc odečtena referenční plocha. Na obr. 6.3 resp. 6.4 je zobrazen výsledek rekonstruované horní resp. dolní oblasti po nafitování a převedení hodnot fáze na hodnoty výšky.

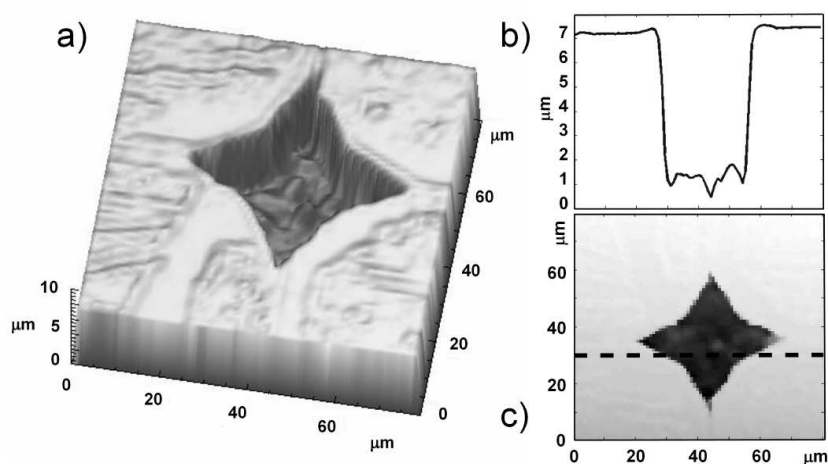
### 6.4.3 Referenční měření

Referenční měření bylo převzato z [2], kde bylo provedeno na bezkontaktním profilometru MicroProf FRT (Fries Research & Technology GmbH). V této práci byl měřen stejný vzorek, pouze měřená oblast (hvězda) byla odlišná.

Podle [2] je princip profilometru založen na zesílené barevné vadě spojně čočky. Spojnou čočkou prochází světelný svazek z halogenové žárovky a dopadá na zkoumaný povrch. Kvůli barevné vadě spojně čočky leží poloha ohniska ve směru optické osy pro každou vlnovou délku v jiné poloze vzhledem k povrchu vzorku. Zpětně odražené světlo je pomocí optického vlákna přivedeno do spektrometru (obr. 6.4). na zkoumaný povrch je zaostřena ta vlnová délka, která má nejvyšší intenzitu. Výšková mapa se získá ze spektrálního rozložení intenzity převodem, pomocí kalibračních tabulek.



Obrázek 6.4: a) Schematický náčrtek profilometru MicroProf FRT. b) Díky barevné vadě spojně čočky jsou jednotlivé složky spektra světelného zdroje zaostřeny do různých rovin. Převzato z [2].



Obrázek 6.5: Referenční měření provedené optickým profilometrem MicroProf FRT. a) trojrozměrná rekonstrukce povrchu struktury vzorku. b) Profil řezu povrchové struktury tak jak je znázorněno čárkovanou čarou v c). Převzato z [2].

#### 6.4.4 Vyhodnocení experimentu

Úkolem měření hluboké binární struktury povrchu vzorku bylo určení výškového rozdílu mezi horní a dolní úrovní. Na obrázku 6.2 a 6.3 jsou znázorněny výsledné rekonstrukce. Oba obrázky jsou spolu svázané, jak je patrné z barevné stupnice výšek. Obrázek 6.2 představuje mapu rozložení výšek v dolní oblasti a obrázek 6.3 mapu výšek v oblasti horní. Přesnost s jakou jsme schopni měření provádět, se odvíjí od přesnosti stanovení hodnoty fáze. Postupem uvedeným v [2] lze vytvořit mapu rozptylu hodnot naměřené fáze a z ní pak mapu rozptylu hodnot naměřené výšky. Z mapy rozptylu výšky lze stanovit hranici přípustného rozptylu hodnot výšky. V našem měření byla tato hranice stanovena na 5 nm. Aplikací tohoto kritéria na výsledné zobrazení dojde k vyloučení těch oblastí, ve kterých velikost rozptylu hodnot výšky překročí přípustnou hranici. Mezi faktory ovlivňující přesnost měření patří také PID regulátor popsáný v podkapitole 6.1, který se používá ke stabilizaci vzorku v požadované poloze vůči objektivu mikroskopu. Měření provedená v [7] potvrdila jeho vysokou stabilitu, kdy po dobu 11 hodin byly odchylky od nastavené hodnoty  $\pm 1$  nm. Přesnost stabilizace je však závislá na obrazové fázi.

Z obrázků 6.2 a 6.3 je patrné, že výškový rozdíl mezi horní a spodní úrovní zkoumaného povrchu je přibližně 6300 nm, což odpovídá výsledku referenčního měření jenž činí  $(6280 \pm 98)$  nm.

#### 6.5 Konstrukční úpravy

Úspěšně provedený výše popsáný experiment prokázal funkčnost automatizovaného osvětlovacího systému. Během tohoto experimentu bylo provedeno 413 snímků v nekoherentním módu. Celé měření trvalo 97 minut, přičemž jeden cyklus znázorněný na obrázku 4.2 trval okolo 14. sekund. To je přibližně stejně dlouho jako při manuálním měření stejného vzorku. Proto bylo rozepsáno časové schéma jednoho cyklu, znázorněné v tabulce 6.1 a hledáno takové řešení, které by snížilo časové prodlevy jednoho cyklu. V prvním sloupci tabulky 6.1 je popsán proces, který právě probíhá a v druhém sloupci je čas, potřebný k průběhu procesu v sekundách. Vypnutí PID regulace v prvním procesu trvá stejně jako změna apertur clony zlomek sekundy. Z toho vyplývá, že časová prodleva 2,5 sekundy je v prvním i třetím procesu způsobena lineárním motorkem. Snížení časové hodnoty lze provést dvěma způsoby. První způsob je výměna lineárního motorku s planetovou převodovkou za motorek, který by byl rychlejší. Druhý způsob spočívá v úpravě kotouče na uložení spektrálních filtrů. Současný kotouč má díry pro uložení filtrů umístěny na roztečné kružnici po  $90^\circ$ . Úpravou kotouče tak, aby na roztečné kružnici bylo 8 děr po  $45^\circ$  (viz obr. 6.6), by došlo k urychlení prvního a třetího procesu o polovinu. Spojíme-li oba způsoby, dojde ke snížení časové prodlevy až o dvě sekundy. Použijeme-li navíc místo lineárního motorku motorek krokový, dojde k přesnějšímu polohování spektrálních filtrů vůči optické ose. Ostatní časové prodlevy v tabulce 6.1 jsou nutné pro správný průběh měření. S novým krokovým motorkem a upraveným kotoučem na uchycení spektrálních filtrů se tedy může jeden cyklus zkrátit ze 14 sekund až na 10 sekund. To by při měření stejného experimentu, popsáného v této kapitole, znamenalo snížení doby měření až o půl hodiny.

Další konstrukční úprava spočívá ve výměně irisové clony. Apertura současné irisové clony, která má tvar kosodélníku, není vhodná pro měření nerovinných mělkých povrchů z důvodu popsáných v kapitole 5.2.1.1. Z tohoto důvodu clona nemůže být použita a k řízení koherence osvětlení lze použít pouze spektrálních filtrů. Výměnou irisové clony za clonu, jejíž apertura má tvar přibližně kruhový by došlo k rozšíření možností použití automatizovaného osvětlovacího systému.

proces	čas [s]
natočení motorku, PID regulace - off, apertura clony otevřena na maximální úroveň	2,5
záznam komplexní amplitudy	2,5
natočení motorku, zmenšení aperture clony	2,5
čekání	1
PID - on	-
čekání	0,5
PID - off, posun stolku o $\Delta\phi$ , PID - on	5

Tabulka 6.1: Časové schéma jednoho cyklu měření hlubokých povrchů. První sloupec znázorňuje probíhající proces a druhý sloupec zobrazuje čas potřebný k provedení daného procesu v sekundách.



Obrázek 6.6: Schematický model upraveného kotouče sloužícího na uchycení spektrálních filtrů.

## Kapitola 7

### Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a sestavit konstrukční uspořádání osvětlovací soustavy reflexního DHM tak, aby vyhověla požadavkům na plné zautomatizování měřící metody povrchů s velkými výškovými změnami v jejich topografii. Byla navržena různá řešení a uspořádání a na základě stanovených kritérií byly vybrány ty konstrukční prvky, které tyto kritéria splňovaly nebo se jim nejvíce přiblížily. Při konstrukci byly upřednostňovány ty prvky, které byly k dispozici v Laboratoři optické mikroskopie, kde diplomová práce probíhala. Mezi tyto prvky patří lineární motorek MAXON a dublet, který byl použit jako kolektor. Na základě výpočtů v programu ZEMAX byly zvoleny optimální polohy jednotlivých optických prvků. Pro řízení prostorové koherence byla vybrána irisová clona, která byla součástí CCTV objektivu od firmy JENSEN. Nevýhodou této clony je tvar apertury, který má tvar kosodélníku. Pro účely zautomatizované měřící metody však tato clona postačuje. Na obrázku 5.22 je zobrazen již zkonstruovaný osvětlovací systém, který je připojen k reflexnímu DHM. Všechny vyráběné součástky byly zhotoveny v dílně na Ústavu fyzikálního inženýrství, pouze spojovací rameno bylo vyrobeno na základě nároků na vysokou přesnost na CNC frézce. Důvodem k vysoké přesnosti výroby spojovacího ramene byla jednoduchost a přesnost uchycení osvětlovací soustavy k mikroskopu.

Dalším cílem diplomové práce bylo experimentální ověření navržené sestavy na vhodném vzorku, který by obsahoval fázovou neurčitost  $n2\pi$ . Experiment byl proveden na křemíkovém vzorku, na kterém byla vyleptána struktura s hloubkou v řádu jednotek mikrometrů. Z výsledků měření a z porovnáním výsledků z referenčního měření na profilometru MicroProf FRT vyplývá, že automatizovaná měřící metoda funguje. Vzhledem k tomu, že po celou dobu experimentu nemuselo být do průběhu měření zasazeno s výjimkou přesunu oblasti, ze které se pomocí PID regulátoru z obrazové fáze stabilizoval mikroskopový stolek, lze cíle práce považovat za splněné.

Z délky měření, které trvalo 97 minut, je patrné, že vzhledem k manuálnímu měření nedošlo k velkému zrychlení metody. Toho lze dosáhnout úpravou kotouče se spektrálními filtry tak, jak je znázorněno na obrázku 6.6, kdy je počet otvorů pro uložení spektrálních filtrů zdvojnásoben. Další možnost spočívá ve výměně lineárního motorku za motorek krokový, který by byl rychlejší. Tím by se docílilo zkrácení doby jednoho cyklu měření ze 14 sekund až na 10 sekund. Při stejném měření jako bylo provedeno v této práci by to znamenalo časovou úsporu až 30 minut. Výměnou lineárního motorku za motorek krokový by navíc došlo ke zpřesnění natáčení spektrálních filtrů vůči optické ose.

Vzhledem k tvaru apertury irisové clony by mohlo dojít ke zkreslení měření struktury, jejíž rozměry jsou blízké příčnému rozlišení mikroskopu. Výměnou stávající irisové clony za clonu jejíž tvar by odpovídal kruhu by došlo k zpřesnění měření těchto struktur.

Provedením všech zmíněných konstrukčních úprav by došlo k plnému využití možností osvětlovací soustavy a k zefektivnění procesu měření popsaného v kapitole 4.

# Literatura

- [1] LOVICAR L., KVASNICA L., CHMELÍK R.: Surface observation and measurement by means of digital holographic microscope with arbitrary degree of coherence, Proceedings of SPIE, vol. 7141, s. 71411S-8, ISBN 978-0-8194-7383-7, (2008).
- [2] LOVICAR L.: *Profilometrie pomocí reflexní digitální holografické mikroskopie*. [Disertační práce.] Brno: VUT, FSI, 2010. 70 s.
- [3] Denis Gabor, Autobiography [online] [cit 17.1.2010].<<http://www.wikipedia.cz>>.
- [4] Holography [online] [cit 25.4.2010] .<<http://www.wikipedia.org>>.
- [5] CHMELÍK R.: Trojrozměrné zobrazení v mikroskopii. Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT, Brno 2003.
- [6] JANEČKOVÁ H., VESELÝ P., CHMELÍK R.: Aplikace digitálního transmisního holografického mikroskopu. *Aplikovaná optika a mikroskopie*, 2008, p. 35-44.
- [7] KVASNICA L.: *Řízení optického stolku interferenčního mikroskopu na základě obrazové fáze*. [Diplomová práce.] Brno: VUT, FSI, 2008. 59 s.
- [8] JANEČKOVÁ H.: *Mikroskopie časově proměnných biologických objektů*. [Disertační práce.] Brno: VUT, FSI, 2010. 60 s.
- [9] LOWENTHAL S., JOYENX D.: Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser. *Journal of the optical society of america*, 1971, vol. 61, p 847-851.
- [10] SALEH B. E. A., TEICH M. C.: *Základy fotoniky I*. Matfyzpress, Praha 1994.
- [11] JANEČKOVÁ H.: *Interferenční mikroskopie biologických vzorků*. [Diplomová práce.] Brno: VUT, FSI, 2006. 49 s.
- [12] ANTOŠOVÁ I.: *Holografický konfokální mikroskop zobrazující odraženým světlem*. [Pojednání k doktorské zkoušce.] Brno: VUT, FSI, 2002. 30 s.
- [13] CHMELÍK R.: *Korelační mikroskopie, alternativní metoda vícekanálového konfokálního zobrazení*. [Habilitační práce.] Brno: VUT, FSI, 2001. 69 s.
- [14] LOVICAR L.: *Profilometrie povrchu v holografickém konfokálním mikroskopu*. [Diplomová práce.] Brno: VUT, FSI, 2002. 71 s.



# Seznam příloh

## Příloha č. 1

Výkresová dokumentace:

- 4 – 01 Držák dubletu
- 4 – 02 Držák clony
- 4 – 03 Dublet
- 4 – 04 Závitový kroužek 1
- 4 – 05 Závitový kroužek 2
- 4 – 06 Držák vlákna
- 4 – 07 Držák matnice
- 4 – 08 Nosné rameno
- 4 – 09 Držák tubusu
- 4 – 10 Držák filtrů
- 4 – 11 Redukce
- 3 – 12 Spojovací rameno